INVESTIGACION y CIENCIA

LOS CONFINES DEL SISTEMA SOLAR

MEDIDAS PARA LA PREVENCION DEL CANCER

CONSISTENCIA Y FLEXIBILIDAD DE LAS REDES

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

CIENCIA Y TECNICA DE LA PREPARACION OLIMPICA



JULIO 1996
800 PTAS.



Julio de 1996 Número 238

SECCIONES



Portada: Robert Rodríguez

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6	Craig Mauzy y Marie Mauzy, cortesía del Museo de la Acrópolis
7	Cortesía de la Universidad de Cambridge (*arriba*); After Hibberd V. B. Kline, cortesía de Thomas E. Weil, Jr. (*abajo*)
8-9	Roberto Osti (*arriba*); Everett Col. (*izda.*); After Sidney Hall, cortesía de John R. Hale (*dcha.*)
10	Roberto Osti (*arriba*); cortesía de Thomas E. Weil, Jr. (*abajo*)
11	Mark Myers
14-15	Alfred T. Kamajian
16	Peter Samek
17	Peter Samek (*dibujo*); Jane X. Luu y David C. Jewitt
18	Peter Samek (*izquierda*); Observatorio de Yerkes (*derecha*)
19	Jane X. Luu y David C. Jewitt
20	Peter Samek
22-23	Robert Fox, Impact Visuals (*fotografía*); Laurie Grace
24	A. M. Jeffrey, I. B. Weinstein *et al.*, Universidad de Columbia (*izda.*); Michel Maiofiss, Gamma Liaison (*dcha.*); Regina M. Santella, Univ. de Columbia (*inf.*)
25	Lisa Burnett
26	Bryan Christie
27	Christopher Pillitz, Matrix
28	Richard Elkins, Gamma Liaison; Bryan Christie (*gráfico*)
40-41	Jared Schneidman/JSD
42	Ola Røe, Røe Foto
43	John Paul, Gamma Liaison (*fotografía del fondo*); Ola Røe, Røe Foto (*fotografía de pantalla*)
44	Cortesía de Netscape
45	Andrew Lichtenstein
49-54	Le Scienze
57-62	Jorge F. Gamboa, José L. Cortés y Luis F. Velázquez
64-65	Cameraphoto-arte/Art Resource (*arriba*); Ken Regan, Camera 5
66-67	Pascal Rondeau (*arriba*); cortesía de Jay T. Kearney (*derecha*); Laurie Grace (*gráficos y dibujos*)
71-73	Laurie Grace (*gráficos*)
74-75	Departamento. Norteamericano de Energía/Boeing
76	Michael Goodman
78	Departamento. Norteamericano de Energía/Boeing
79	Phil Schofield
80-81	Departamento. Norteamericano de Energía/Boeing
82	Phil Schofield
84-85	Bryan Christie
87-88	Johnny Johnson

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Laureano Carbonell: *La boga en la Gracia clásica*; Mónica E. Murphy: *El cinturón de Kuiper*; Ana Mª Rubio: *Indicadores internos del riesgo de cáncer*; Luis Bou: *Programación para redes fiables* y *Juegos matemáticos*; José Mª Valderas Martínez: *Bases neurológicas de la adicción a la cocaína*; Esteban Santiago: *La preparación del atleta olímpico*; Juan Pedro Campos: *Cementerios nucleares*; José Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*;

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Ahora que el radar ha demostrado que el espacio que rodea a la Tierra no es infranqueable para las ondas de radio, la radiotransmisión entre dos puntos de la superficie terrestre aprovechando la reflexión en la Luna ha entrado en el reino de lo posible. Si desde una antena se enviase a la Luna un pulso de frecuencia ultraelevada, el receptor podría encontrarse en cualquier lugar de la Tierra desde el cual también "se viese" la Luna. Por consiguiente, quedaría eliminado el efecto bloqueador de la curvatura terrestre sobre la transmisión de altas frecuencias en línea visual y serían posibles las emisiones de televisión a escala nacional desde una emisora central.»

«La demanda de casas prefabricadas construidas según los principios de la producción en masa está adquiendo un desarrollo espectacular. Los diseños de prefabricados abarcan desde los artículos más clásicos hasta extrañas estructuras hemisféricas de aluminio aleado y acero con un mástil central, estando el conjunto construido siguiendo las mismas ideas que los puentes colgantes. El aspecto de algunas es tan innovador que se cuestiona seriamente que el público vaya a aceptarlas. Con independencia del diseño, persiste el fantasma del problema de los materiales. Hasta que se alivien las carestías y los constructores de viviendas puedan perfeccionar sus planes, se sufrirán retrasos lo mismo en las prefabricadas que en las casas tradicionales levantadas a mano.»

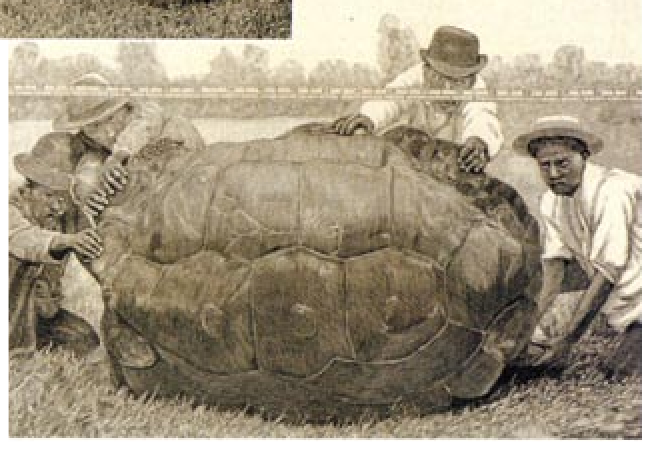
...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Un nuevo organismo oficial comenzará a existir el día uno del mes próximo bajo el nombre de Servicio de Inspección Biológica. Además de marcar las zonas del país en que sea posible cultivar con éxito plantas y animales de interés, el doctor C. Hart Merriman afirma que su servicio determinará las zonas en que abundan los insectos y los animales nocivos, así como las malas hierbas, o que sea probable que emigren cuando se introduzcan determinadas especies. Esto, además, se cree que ahorrará a nuestro país muchos millares de dólares.»

«Los estragos de la peste bovina en Sudáfrica se dice que son más espantosos que cualquier otra plaga del ganado que haya afectado a la región en lo que alcanza la memoria. Como ejemplo de la devastación desencadenada en Bechuanalandia, se informa que Khama, el Jefe Supremo, que visitó hace poco Inglaterra, ha perdido ocho mil cabezas sólo de sus rebaños privados. Según las noticias más recientes, en Pitsani las reses morían a centenares cada día. Para los nativos surafricanos el ganado constituye un medio de intercambio y un elemento básico de su dieta.»

«Según un informe hecho público por el Departamento de Agricultura de EE.UU. los análisis de la leche llevados a cabo en diversos lugares revelaron una cantidad de microbios que varía entre 11.500 y 318.000 por gramo. La leche consumida en Boston se encontró especialmente rica en microbios con 4.750.000 gérmenes por gramo. Aunque últimamente en nuestro país se ha hecho mucho para mejorar las condiciones sanitarias en lo que al abastecimiento público de leche se refiere, todavía queda largo camino por recorrer. No puede haber duda de que el próximo paso importante a dar será conseguir que nuestras lecherías distribuyan sólo leche y mantequilla 'pasteurizadas'.»

«La ilustración de este número presenta una imagen de una tortuga terrestre gigante de las Islas Egmont, situadas al noreste de Madagascar. La longitud en línea recta del caparazón es de 1,32 metros. La vista del espaldar, junto al que se ve una vara métrica y a cuatro hombres sujetando al animal, ofrece una idea perfecta del tamaño de este gigantesco reptil, cuyo peso es de 240 kilogramos. Esta tortuga probablemente pertenezca a la especie *Testudo Daudinii*.»



Tortuga terrestre gigante de las islas del Océano Indico

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Según afirma un corresponsal, no se tardará mucho en que el actual sistema de encendido de las lámparas de gas urbanas, lento e irregular, se sustituya por un sistema simultáneo e instantáneo basado en la electricidad. Afirma además: 'Confieso que me asombra que la electricidad nunca se haya utilizado con el motor de vapor, cuando toda inteligencia despejada debe percibir que finalmente aboliría el uso de combustibles y calderas y sus elementos auxiliares.'»

«Se ha descubierto recientemente que del lecho del río Monongahela, en un punto frente a Pittsburg, mana un flujo continuo de un gas fuertemente tóxico, compuesto en parte de amoníaco. Bañándose en ese lugar del río se han ahogado varias personas, se supone que a causa de inhalar ese gas; y hace poco a un pequeño caimán, que había respirado algo de ese gas, le costó un enorme esfuerzo alcanzar la orilla para morir enseguida.»

La boga en la Grecia clásica

La flota que derrotó en Salamina a las huestes del rey Jerjes sacó el máximo rendimiento de la estrepada mediante una técnica que los remeros deportivos volvieron a inventar en el siglo XIX

John R. Hale

Cuando las naves griegas dominaban el Mediterráneo, en la era clásica de las galeras de remo, los atenienses ejercían la hegemonía sobre los demás helenos. La mayoría de los estados basaban su poderío militar en la caballería de base aristocrática o la infantería de composición más popular, pero Atenas, movilizando muchos miles de ciudadanos de un nivel social bajo, los utilizó como remeros de la flota. Temístocles, el genio de esta política naval, supo resistir los ataques hiperbólicos de sus rivales más conservadores, quienes le acusaban de "haber robado la lanza y el escudo a los atenienses degradándoles al cojín y el remo". La alusión a los remos es muy clara y evidente, pues cada trirreme o galera de guerra ateniense con tres órdenes de remos llevaba 170 remeros. Pero, ¿por qué mencionaban el cojín?

Este cojín o asiento constituye un enigma, uno de los muchos existentes en la historia de la técnica. Por mi parte creo haber encontrado la solución de este misterio, considerando que los cojines usados por los remeros griegos eran uno de esos avances técnicos modestos —comparable al estribo en equitación o el arco largo introducido en la Edad Media—, pero capaces de decidir la suerte de un imperio. Aunque hoy sea un enigma, el cojín en cuestión resultaba en aquella época tan familiar que incluso el geógrafo griego Eratóstenes describió Mesopotamia diciendo que tenía su forma. Cuando no existe ninguna explicación escrita, como sucede en este caso, los historiadores debemos buscar la solución apoyándonos en los detalles que afortunadamente han resistido el paso del tiempo. Al igual que sucede con otros muchos elementos de carácter técnico, es probable que nadie se tomara la molestia de describirlo o representarlo.

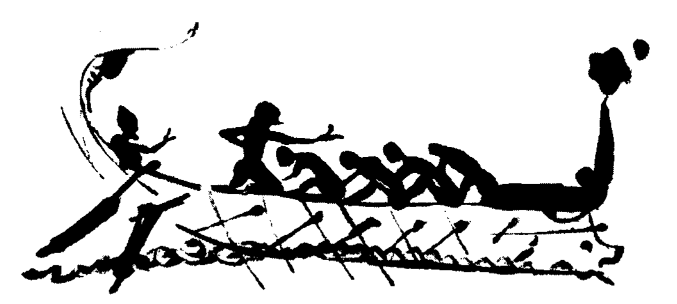
Por fortuna disponemos de algo más de información, además de saber que su forma recordaba la de Mesopotamia —esto es, ancho en el centro y estrecho en los extremos—. El cojín (*hyperesion* en griego, que significa "debajo del remero") era en realidad una culera. Los eruditos romanos y bizantinos que confeccionaron diccionarios para explicar los términos oscuros existentes en los textos griegos dieron varias definiciones del *hyperesion*, en las que se decía que se trataba de un pedazo de piel de cordero, con su lana, de un trozo de cuero o de un forro destinado a evitar que el roce irritara las posaderas de los remeros. El remero lo llevaba puesto: cierto orador ateniense lamentaba el aspecto ridículo de sus paisanos en el extranjero, cuando iban a tierra sin quitárselo. De ahí se desprende que era un elemento muy corriente. Cuando los espartanos lanzaron un ataque anfibio contra Atenas el 429 a. de C. cada remero se dirigió a la nave donde iba a embarcar llevando el cojín de boga y

1. RELIEVE EN PIEDRA, descubierto en la Acrópolis de Atenas, donde aparece una galera griega de tres órdenes de remos, del tipo llamado trirreme, del siglo V a. de C. La posición del remero con las rodillas levantadas (*en el centro*) sugiere que los remeros de la Grecia clásica practicaban la estrepada con deslizamiento del cuerpo, para aprovechar mejor la capacidad de los músculos de las piernas.



un remo. Curiosamente, las referencias de este tipo se encuentran sólo en fuentes griegas.

Las naves de guerra romanas eran similares a las de los griegos, aunque los remeros romanos no usaban tales cojines. En latín no existe ninguna palabra para designarlo. En las galeras venecianas de la Edad Media y del Renacimiento tampoco los emplearon. De haberlo hecho es probable que alguien lo hubiera mencionado. Los inventarios navales venecianos, muy detallados y que recogen todos los elementos, sin olvidarse siquiera de los gorros de los remeros, los habrían citado. ¿Debemos creer, pues, que los griegos, espartanos incluidos, tan famosos por su austeridad, eran tan delicados que no podían bogar estando sentados directamente sobre un banco desnudo?



2. DECORACION de un vaso corintio del siglo VI a. de C. donde aparecen los remeros con las rodillas levantadas.

Para resolver este enigma es preciso tener en cuenta que, a lo largo de la historia, han existido diversas técnicas de boga distintas. En un comienzo, algún inventor prehistórico debió descubrir el uso del canalete a modo de remo, tras apoyarlo y sujetarlo al costado de la embarcación. Luego, una vez comprobada la superioridad del remo, se pasó al desarrollo de una vasta variedad de modos de boga. Las técnicas varían desde el singar, propio de los gondoleros venecianos, consistente en mover un solo remo hacia uno y otro lado como si se tratara de la cola de un pez, a la estrepada usual en las galeras medievales, cuyos remos eran tan grandes que los remeros debían ponerse de pie e inclinar el tórax hacia popa para llevar la pala hacia proa, para luego sentarse mientras hacían fuerza con ella en el agua. La boga permitió a los vikingos la travesía del Atlántico y a los fenicios el viaje de circunnavegación de Africa. El esfuerzo humano era decisivo en las marinas de los griegos de la antigüedad clásica, cuyas flotas de guerra estaban compuestas por galeras con forma de torpedo, armadas con robustos espolones de bronce fijos a la roda (*véase* “Naves de guerra a remo en la antigüedad”, por Vernard Foley y Werner Soedel; en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1981).

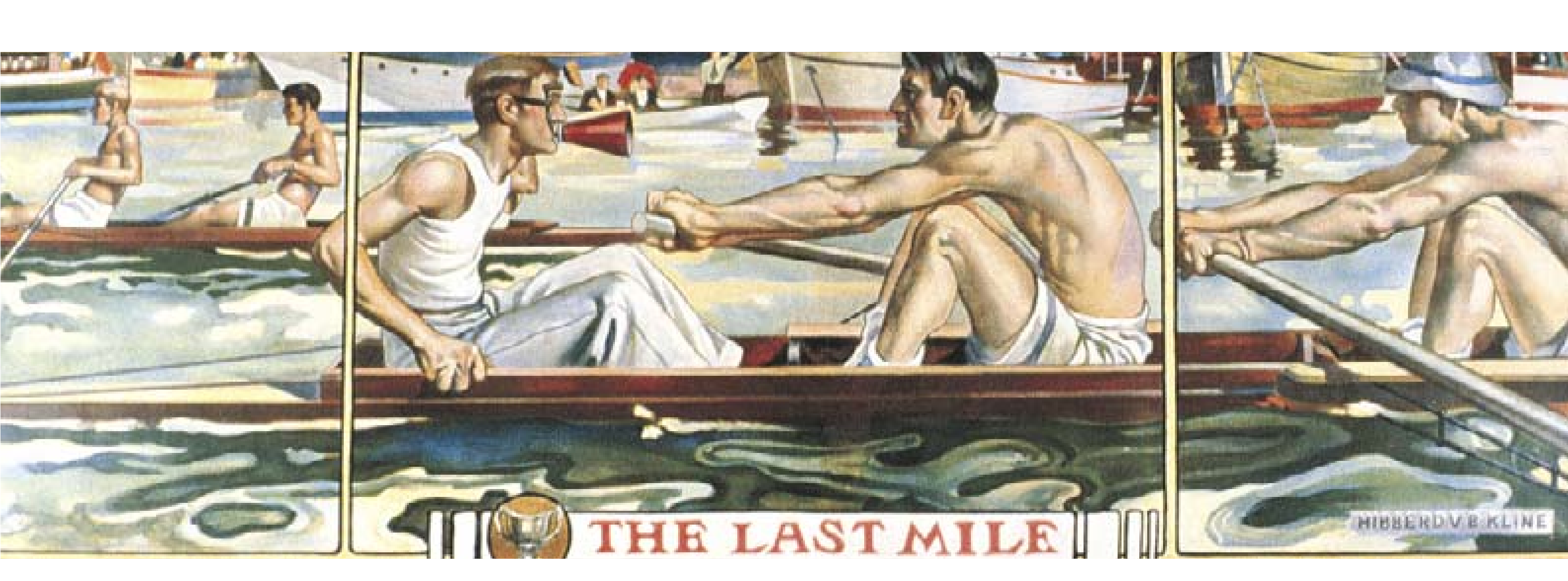
Piel de ante y mantequilla

Entre las diversas modalidades de boga que han existido a lo largo del tiempo, hay una del siglo XIX que, al igual que sucedía en el mundo griego antiguo, requería el empleo de un pedazo de cuero. En los años cincuenta y sesenta de esa centuria los remeros de regatas de los EE.UU., Canadá y del Reino Unido empezaron a experimentar con una culera de gamuza cosida a los pantalones que usaban para bogar. Así, y después de engrasar convenientemente la gamuza, el remero podía deslizarse hacia proa y popa sobre la tabla plana donde iba sentado, aumentado de ese modo la longitud de la estrepada y añadiendo al movimiento de sus brazos y espalda el extraordinario esfuerzo de los poderosos músculos de las piernas.

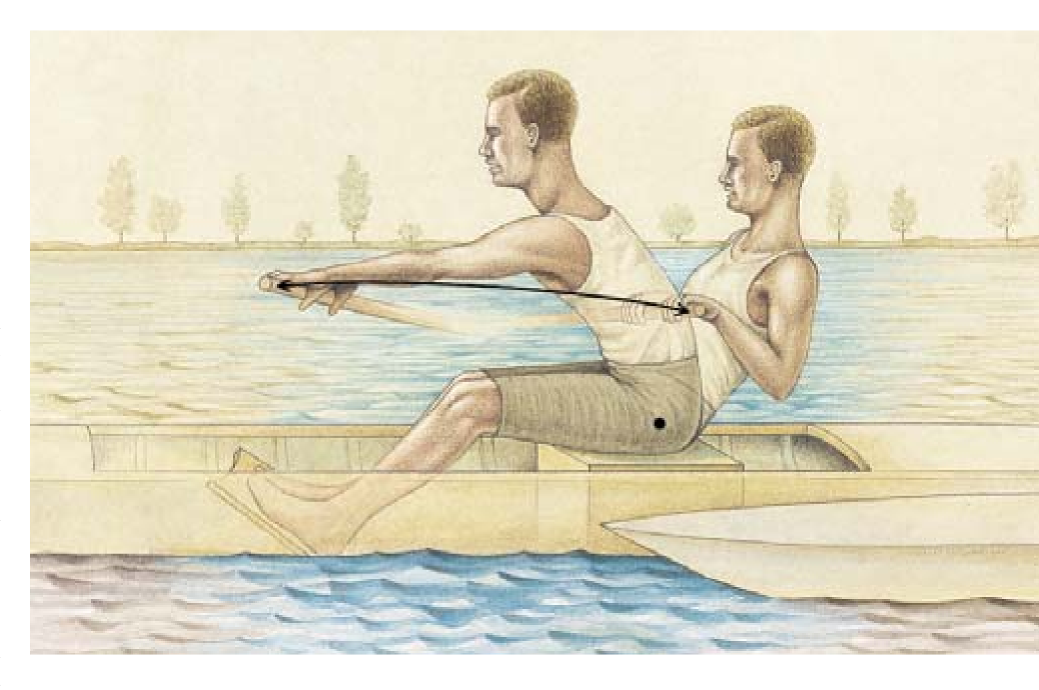
La edición de 1871 del *Annual Illustrated Catalogue and Oarsman’s Manual*, de George T. Balch, pone de manifiesto las ventajas de esa innovación. “El asiento consiste en una plancha delgada de madera dura, por lo general cerezo, de poro muy fino y bien pulida, con la veta orientada en sentido de proa a popa. Para disminuir aún más el roce, los remeros llevan, en los pantalones, una culera de gamuza, convenientemente engrasada.” Balch llamaba boga con “piel de ante y mantequilla” la realizada con tal atuendo. El catálogo incluía, como complementos del equipo de boga, varias pócimas medicinales para tratar las irritaciones y ampollas producidas por el roce.

Como el premio para el ganador de una regata era muy alto, hasta alcanzar los 4000 dólares, los remeros buscaban ávidamente cualquier fórmula que les permitiera aumentar la velocidad. Y ante la evidencia de que cada centímetro de recorrido del puño del remo

3. LOS REMEROS DEPORTIVOS ingleses y norteamericanos redescubrieron, a mediados del siglo XIX, las ventajas de la estrepada con deslizamiento del cuerpo. Una litografía de principios del siglo XX muestra la posición encogida de las piernas, al inicio de la estrepada (*remeros en primer término*), y con las piernas completamente estiradas (*remeros del fondo*).



4. EL REMERO DE POSICION FIJA da cada estrepada aplicando el esfuerzo de los músculos de los brazos y espalda (*flecha negra*). Las piernas le sirven de apoyo, pero no puede mantener las rodillas muy altas para no entorpecer los movimientos del remo.



daba lugar a dos de la pala en el agua, la aplicación de un deslizamiento del cuerpo de sólo 15 cm representaba aumentar el largo de la estrepada en 30 cm, con gran incidencia al principio de ella, la más decisiva en términos de rendimiento. Esto no se podía conseguir con un asiento fijo, que obliga a bogar del modo usual: inclinar notablemente el tórax hacia delante, para irlo levantando en el transcurso de la estrepada.

Las regatas de remo del siglo pasado tenían algo en común con los enfrentamientos navales de la antigüedad: la victoria o la derrota dependía de la habilidad de conseguir una virada muy cerrada a elevada velocidad. Los regatistas de la era victoriana se dirigían a una baliza fija, la bojeaban rápidamente y luego recorrían en sentido contrario el mismo camino que habían hecho, hasta terminar en el punto de donde habían salido. Una pintura muy famosa de Thomas Eakins, "Los hermanos Biglin doblando la baliza", de 1873, muestra la importancia de la estrepada del remero situado en la parte exterior de la curva para acelerar la rapidez de giro. La estrepada con deslizamiento del remero —la boga con piel de ante y mantequilla de Balch— era la mejor en esa maniobra.

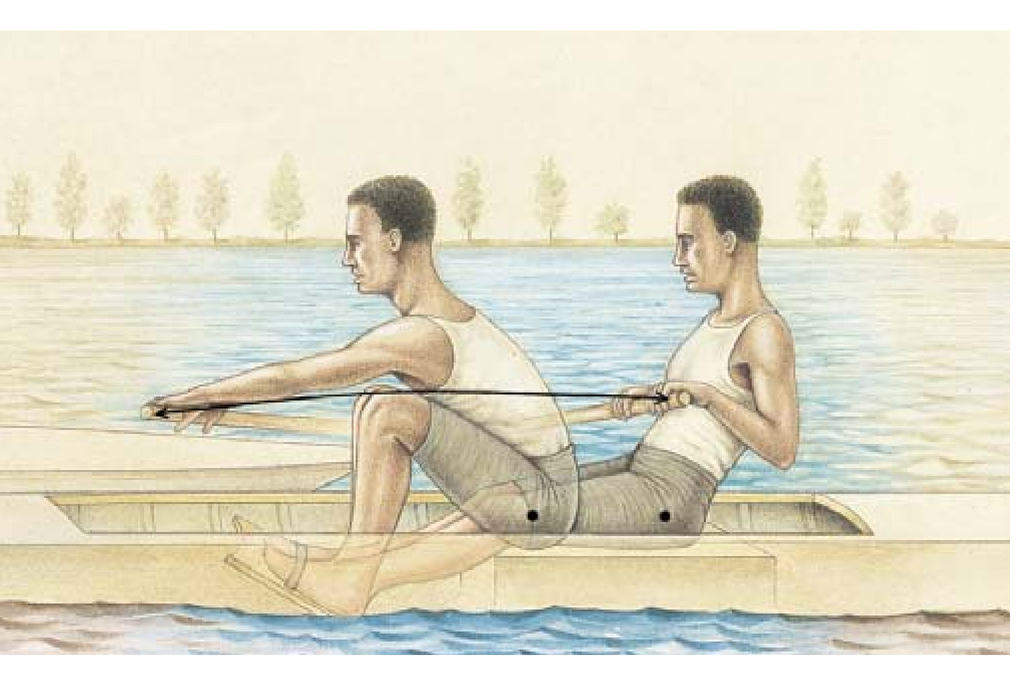
El parche de piel engrasada del siglo XIX quedó superado por la implantación de un medio mecánico que contribuye a facilitar el deslizamiento del cuerpo y prolongarlo más: el asiento de corredera, montado sobre ruedas y capaz de desplazarse hacia proa y popa sobre unas guías a propósito. Los asientos de este tipo formaban parte del equipo básico de las embarcaciones con que se disputaban las regatas entre colegios universitarios, clubs y olímpicas. Actualmente las tripulaciones de las embarcaciones de salvamento australianas, que regatean incluso cuando hay mucho oleaje, no se arriesgan a que el asiento de corredera se rompa o encalle. Prefieren el asiento de madera moldeada y plastificada, de manera que, al igual que hacían los remeros del siglo pasado, puedan deslizarse convenientemente y aumentar así la longitud de la estrepada.



5. EN LAS GALERAS ROMANAS los remeros (que eran hombres libres, y no esclavos, como aparecen en la película *Ben-Hur*) iban sentados en bancos elevados. En estas condiciones no podían en modo alguno realizar la boga con deslizamiento del cuerpo ideada mucho antes por los griegos.

La verdad en el teatro

Es lógico, pues, admitir que los antiguos remeros griegos empleaban los cojines con idéntico objeto que los remeros del siglo XIX la culera de gamuza engrasada: para conseguir el deslizamiento del cuerpo y aumentar el rendimiento de la estrepada. ¿Existen pruebas, cojín aparte, de que los griegos emplearan alguna técnica de deslizamiento del cuerpo? Evidentemente la hay. Lo reflejan las obras artísticas y los relatos literarios. Incluso las técnicas de construcción aportan pruebas del empleo de la boga de ese tipo. Por ejemplo, en la decoración de algunas piezas de cerámica y relieves esculpidos aparecen los remeros sentados con las rodillas inclinadas hacia arriba, prueba evidente de la estrepada con deslizamiento del cuerpo. Estas imágenes demuestran también que los remeros griegos no estaban sentados en bancos elevados sino situados a la altura de sus propios pies. En esta posición, los movimientos del tórax son extremadamente limitados y el método de aplicar el deslizamiento



6. BOGA CON DESLIZAMIENTO del cuerpo. El remero que practica este método aprovecha la mayor capacidad de los músculos de las piernas, dando una estrepada más larga (*flecha negra*) y con un brazo de palanca más grande. En concreto, la estrepada empieza con las piernas encogidas y termina con ellas completamente estiradas.

del cuerpo es el mejor para conseguir una estrepada eficaz.

Con todo, la mayoría de las informaciones relativas a la boga en la antigüedad no proceden de fuentes históricas o manuales técnicos, sino de comedias griegas. Las representaciones satíricas tenían como audiencia principal a las clases bajas, las que nutrían de remeros a la flota ateniense. (En *Ben-Hur*, película filmada en 1959, los remeros se escogían entre los esclavos, cuando en realidad se trataba de hombres libres.) Aristófanes, por ejemplo, creó un coro de ranas que se mofaban de los gritos de un remero bisoño, quejándose del dolor que le producían las ampollas de sus posaderas. El dramaturgo Eupolis escribió también una escena considerada muy común entre los remeros en la que el viejo y duro general Formio enseñaba a un grupo de reacios la forma de bogar. La primera de sus órdenes —"¡Nada de chapotear y salpicar!"— es aplicable a cualquier tipo de boga. Pero la segunda orden que espetó —"¡Estirad las piernas!"— evidencia claramente la estrepada con deslizamiento del cuerpo, la cual empieza con las piernas dobladas y que se van extendiendo en el transcurso de ella.

Las obras de los constructores navales griegos ponen de manifiesto también el uso de la estrepada con deslizamiento del cuerpo del remero. Los trirremes griegos llevaban en cada costado una postiza, con los toletes para los estrobos de los remos. Tales postizas eran muy vulnerables en combate, aunque resultaban imprescindibles para satisfacer las exigencias de la boga. Durante el siglo XIX, la reintroducción de tal forma de boga obligó a aumentar en un 30 por ciento la distancia entre el remero y el luchadero, fulcro o punto de apoyo del remo.

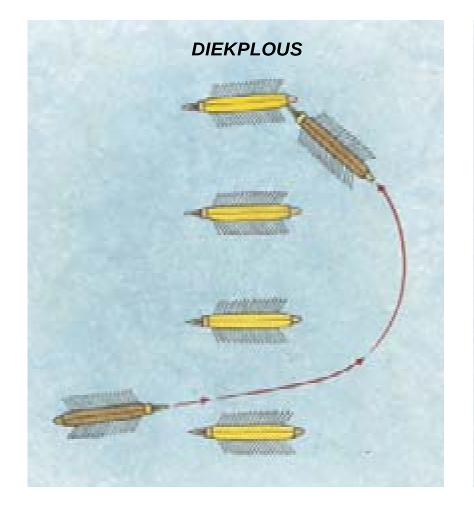
Los constructores de embarcaciones del siglo XIX evolucionaron hasta crear un casco muy bajo y de formas hidrodinámicas, susceptible de desarrollar la mayor velocidad posible. Durante ese proceso, el banco del remero desapareció, sustituido por un asiento situado a la misma altura que sus pies. Los constructores navales de la antigua Grecia llegaron a la misma conclusión, pero por motivos del todo distintos. Con el propósito de acomodar más gente a bordo, los remeros fueron repartidos en varios órdenes, dispuestos a distintos niveles, por encima y por debajo del usual. Para ello y con el fin de aprovechar bien todo el espacio disponible, las piernas de los remeros de un orden debían estar a la altura conveniente, sin entorpecer la boga de los remeros del orden situado debajo.

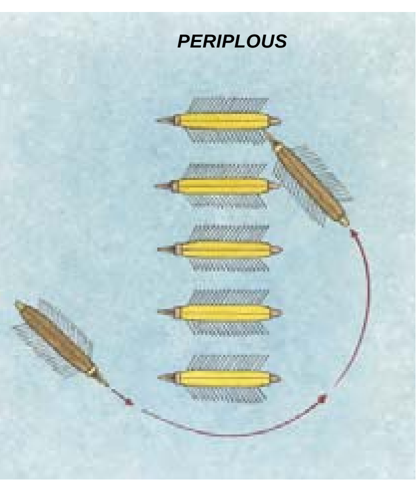
Durante siglos, los eruditos dudaron de que los remeros de los trirremes griegos estuvieran sentados a diferentes alturas, por considerarlo poco práctico. Sin embargo, la existencia de galeras con muchos órdenes de remos quedó plenamente demostrada por John S. Morrison, de la Universidad de Cambridge, cuyas teorías fueron la base de la reconstitución del trirreme *Olympias*, un experimento muy ambicioso en el ámbito de la arqueología naval. Las pruebas de mar de este trirreme confirmaron muchas cosas



7. LOS REMEROS del siglo XIX, tales como el campeón mundial James Renforth de Newcastle (representado en este grabado de madera), adoptaron la estrepada con deslizamiento del cuerpo en los años cincuenta y sesenta. Entonces los remeros usaban culeras de piel engrasada para deslizarse mejor y con más facilidad sobre el asiento. Posteriormente aparecieron los carretones o asientos móviles.

que se venían reivindicando desde hacía tiempo, incluyendo la afirmación de que tales galeras desarrollaban la máxima velocidad combinando la navegación a remo y vela. De todos modos está muy claro que, en combate, los trirremes y demás naves parecidas se movían sólo a remo. Antes habían desarmado los palos y las velas, dejándolos en tierra. Además, la mayoría de las batallas navales empezaban al amanecer, cuando la calma de la mar favorecía el uso óptimo de los remos.





8. TACTICAS DEL COMBATE NAVAL de los trirremes griegos de los siglos V y IV a. C. Tenían por misión última destrozar e inutilizar las naves enemigas a golpe de espolón (*ilustración de la página siguiente*). Esto se podía conseguir mediante dos maniobras distintas, llamadas *diekplous* y *periplous*.

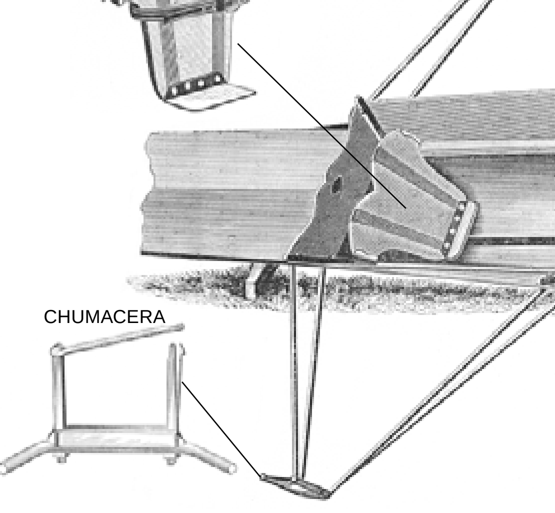
Toda marcha avante

La táctica del combate naval propia de los trirremes era de las más simples jamás ideadas. Se trataba lisa y llanamente de destrozar e inutilizar las naves enemigas a golpe de espolón. Esto se podía conseguir mediante dos maniobras distintas. Ambas consistían en lograr situar la nave en una posición ventajosa a popa o por la aleta de la enemiga, lo cual requería mucha habilidad y hacer la virada con rapidez. Los comandantes evitaban el encuentro de proa contra otra, pues de producirse una colisión de ese tipo los daños sufridos por ambas naves eran similares.

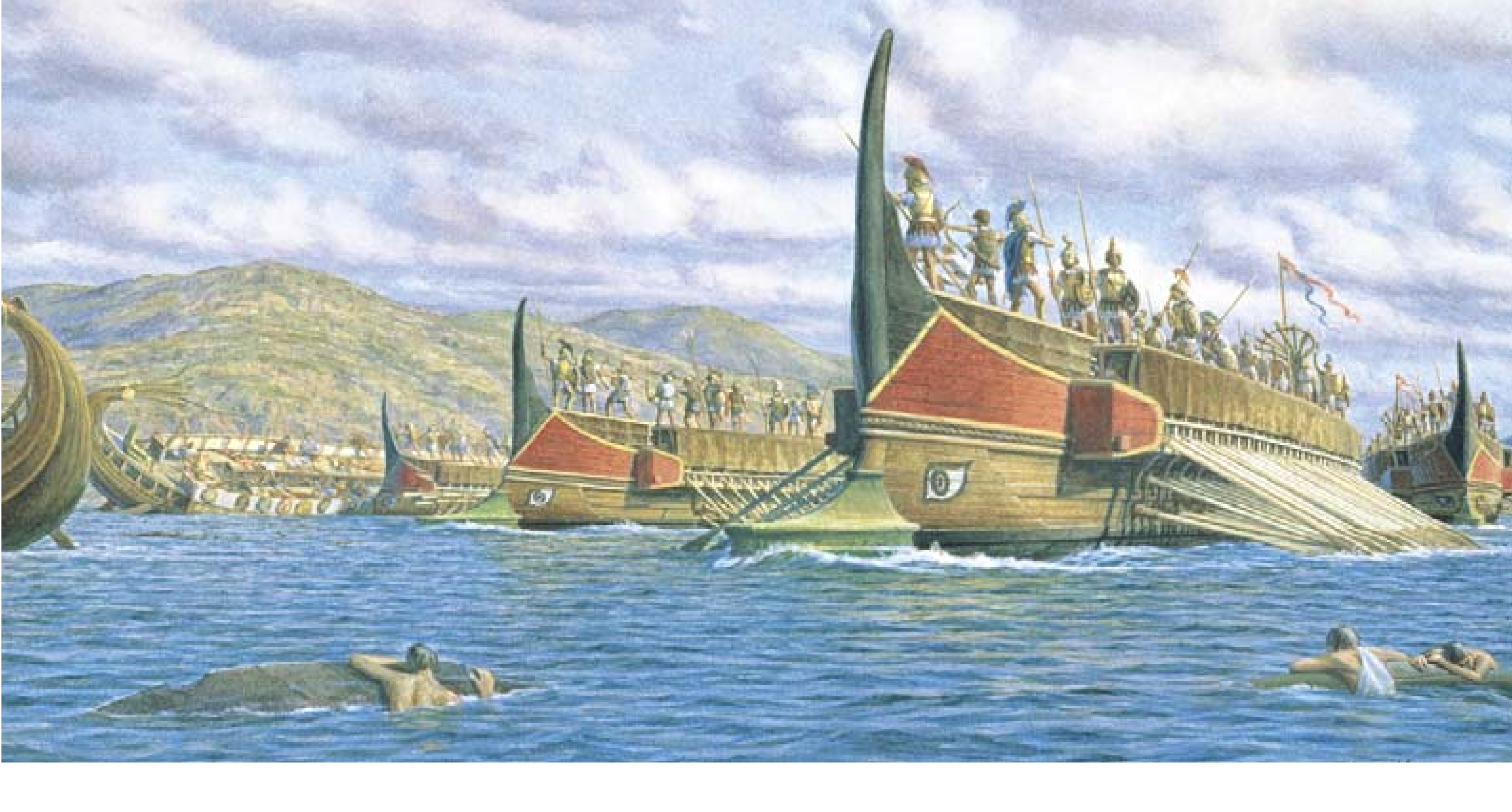
En la maniobra llamada *diekplous* (con la que los griegos designaban la operación de atravesar la línea de naves enemigas), una nave cruzaba por el hueco existente entre dos oponentes para ganar las aguas libres situadas a popa de ellas. Una vez allí, el atacante viraba rápidamente y golpeaba con el espolón la popa o aleta desprotegida de una nave contraria. La segunda maniobra usual era el *periplous* (equivalente a rodeo o contorneo). Cuando el enemigo procuraba estrechar la línea o reforzarla con una segunda para evitar el *diekplous*, el atacante aprovechaba el acortamiento que ello producía en las filas del otro para rodearlo por un extremo. Tanto el *diekplous* como el *periplous* exigían que la nave atacante virara en redondo con prontitud y sin perder demasiada velocidad, una vez se encontraba a popa de las naves enemigas, para no quedar convertida en un blanco fácil.

Uno se da cuenta rápidamente de las ventajas de la estrepada con deslizamiento del cuerpo del remero analizando el combate entre dos galeras griegas en octubre de 429 a. de C., al principio de la guerra del Peloponeso. El comandante espartano Timócrates perseguía a la nave capitana ateniense *Paralos*, mandada por Formio, que se dirigía a puerto en busca de refugio. En esas condiciones Formio no podía virar, pues habría expuesto el costado, muy vulnerable, de su trirreme al espolón del enemigo. Pero, por suerte para él, había una nave mercante fondeada fuera del puerto. Formio no desperdició la oportunidad y en cuanto estuvo al través de ella ordenó virar.

De este modo, usando el mercante fondeado como pantalla, la tripulación ateniense realizó un giro de 270º con tal rapidez que el espartano no tuvo tiempo de iniciar ninguna maniobra de evasión. Y el resultado fue que Formio espoloneó al trirreme enemigo por el centro, destruyéndolo. Timócrates quedó muy afectado por el cambio de fortuna tan repentino y se suicidó allí mismo. En esa maniobra los atenienses ex-



9. LOS ELEMENTOS NECESARIOS PARA LA BOGA aparecen descritos en la edición de 1871 del *Annual Illustrated Catalogue and Oarsman's Manual*. Entre ellos figura un asiento de madera de grano muy fino que facilitaba el deslizamiento del remero, gracias a los pantalones con culera de piel engrasada que llevaba con tal objeto —método conocido por "piel de ante y mantequilla" por los anglosajones.



plotaron la ventaja de la boga con deslizamiento del cuerpo. Formio y su tripulación, excelentemente entrenada, habían hecho una virada redonda perfecta.

En algunos combates navales de la antigüedad ni el *diekplous* ni el *periplous* resultaban adecuados. En tales casos, la ventaja estaba en favor de la nave capaz de realizar una virada de 90º en el menor espacio posible. Esto le permitía lanzarse contra la línea enemiga, y luego, con una rápida maniobra, embestir con el espolón la nave contraria.

El uso más famoso de una virada de ese tipo se dio en Salamina, a fines de septiembre de 480 a. de C. Junto a aquella isla tuvo lugar un sangriento combate entre una liga de ciudades libres griegas, dirigida por Atenas, y la flota invasora del persa Jerjes. El núcleo de la fuerza naval de Jerjes era la flota fenicia de las ciudades de Tiro y Sidón, en el sur del Líbano actual. Los trirremes fenicios carecían de postizas, lo cual implica que no empleaban la estrepada con deslizamiento del cuerpo, al contrario que los griegos.

En Salamina, los griegos, cuya inferioridad numérica era manifiesta, no pudieron usar el *diekplous* ni el *periplous*, pues la impresionante flota persa cerraba los estrechos, de orilla a orilla. En esas condiciones los griegos eran más vulnerables a ambas maniobras por contar con menos efectivos. Entonces optaron por tomar la iniciativa y atacar antes de que los persas pudieran romper o rodear la línea griega. Un testigo explicó que la primera nave griega que se lanzó al ataque hizo una virada tan cerrada y le dio tal espolonazo a una nave enemiga que le arrancó la proa de cuajo. Otras naves griegas tuvieron un éxito similar y en poco tiempo la línea persa quedó empachada de naves que intentaban virar para escapar del descalabro. En el ala izquierda de la flota persa hubo tantas naves inutilizadas que los atenienses lograron finalmente forzar un rodeo de la flota contraria, en un *periplous* rudimentario. De haber podido realizar los persas las viradas redondas con rapidez, los griegos no habrían logrado aprovechar la ventaja inicial.

JOHN R. HALE es arqueólogo y jefe de estudios de la sección de humanidades de la Universidad de Louisville. En sus investigaciones de historia naval, que realizó en Yale, Hale analizó la táctica naval antigua, las pruebas de mar de la arqueología experimental y la evolución de la nave longa vikinga. Entre sus trabajos de campo figuran la excavación, en Portugal, de una villa romana, donde se criaban caballos para carreras de cuadrigas, y campañas de exploración de la Grecia occidental para conocer las bases navales y teatros bélicos.

Después de la batalla de Salamina y una vez el rey Jerjes y sus aliados se retiraron, Atenas empezó a destacar sobre las islas y ciudades del mar Egeo. Un elemento clave del auge del imperio ateniense fue la voluntad de dedicar tiempo, dinero y esfuerzo humano a la construcción de una flota permanente. Atenas pagó el sueldo de 12.000 remeros durante ocho meses, para que aprendieran la técnica de la estrepada con deslizamiento del cuerpo, cuyo dominio requería mucha práctica.

Recuperación de una técnica olvidada

Dada la superioridad de la boga con deslizamiento del cuerpo en el combate con trirremes, ¿por qué cayó en el olvido? La explicación es muy sencilla. Los atenienses no tuvieron motivo para mantener ese método tan eficaz. Ante la imposibilidad de competir con los atenienses, los estados contrarios buscaron la forma de conseguirlo. El 400 a. de C. los cartagineses botaron el primer cuatrirreme. Las galeras de este tipo iniciaron una carrera de armamento cuyo éxito consistía en la multiplicación del número de remeros de cada remo. (El trirreme había llevado siempre un solo hombre por remo.) A medida que las naves y la tripulación de cada una fue aumentando, la fuerza bruta de los músculos de gente inexperta se fue imponiendo sobre la práctica de los profesionales atenienses, obtenida con un largo e

intenso período de entrenamiento. La táctica cambió también. Aparecieron los ganchos con que se aferraban las naves enemigas para abarloarlas y el abordaje sustituyó al empleo del espolón, quedando convertidas las naves de guerra en simples plataformas móviles destinadas al transporte de grupos pequeños de soldados. La estrepada con deslizamiento del cuerpo parece ser que se mantuvo sólo en algunos rincones aislados. La alusión al cojín de boga aparece por última vez en un papiro con el inventario de una galera griega en el río Nilo, varios siglos después de que a los trirremes los hubieran reemplazado por naves más grandes y capaces.

Durante la época en que la perfección de la boga era muy apreciada, su dominio hizo de los atenienses el mayor poder naval del mundo antiguo. Eran éstos muy conscientes del papel desempeñado por su técnica de boga en la victoria sobre la armada del rey Jerjes y que significó el inicio de su hegemonía naval. En una comedia de Aristófanes hay una escena en la que un viejo llamado Demos (que en la sátira representa al "todo Atenas") se sienta en una piedra. Un paisano ateniense le ofreció inmediatamente un cojín del tipo que "prestó tan buenos servicios en Salamina", para que no se le irritaran las nalgas.

El elemento puede parecer humilde, por no decir cómico. Pero el resultado fue que propició la supremacía naval ateniense en el Egeo durante un siglo. Y ello hizo posible la construcción del Partenón, la financiación de la democracia ateniense, la representación de las obras de Sófocles y Aristófanes, y se pusieron las bases para la Academia de Platón y Aristóteles. De hecho, la edad de oro de Atenas surgió del sudor de unos miles de remeros bien entrenados, junto con un pequeño trozo de gamuza y algo de mantequilla.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ATHENIAN TRIREME: THE HISTORY AND RECONSTRUCTION OF AN ANCIENT GREEK WARSHIP. John S. Morrison y John F. Coates. Cambridge University Press, 1986.

THE STORY OF WORLD ROWING. Christopher Dodd. Stanley Paul, 1992.

SHIPS AND SEAFARING IN ANCIENT TIMES. Lionel Casson. University of Texas Press, 1994.

El cinturón de Kuiper

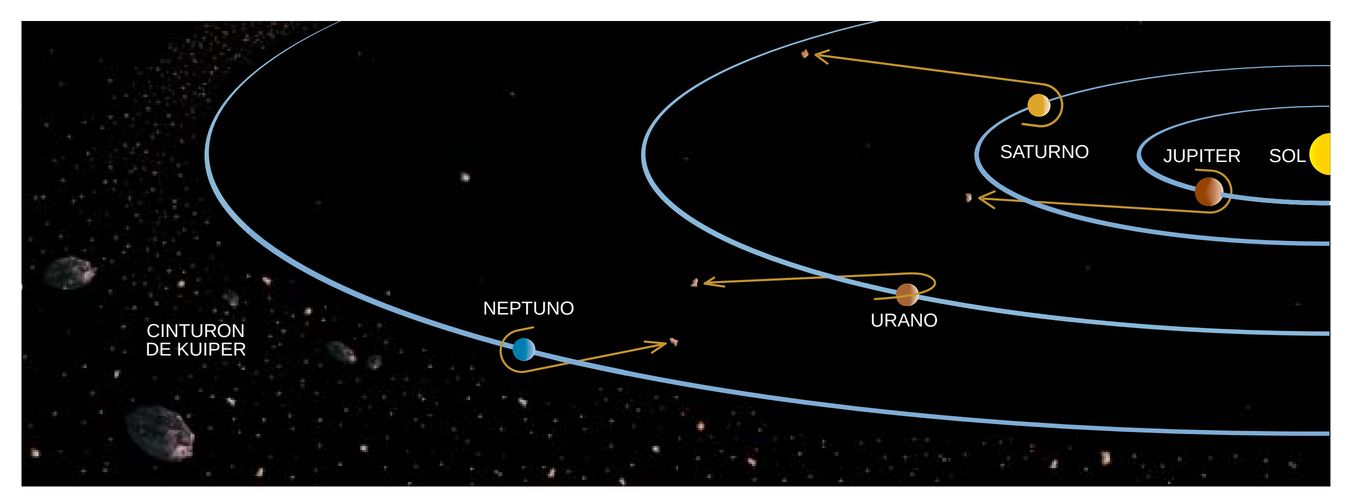
El sistema solar exterior
no termina bruscamente en la órbita de Plutón,
sino que se prolonga en un extenso cinturón de pequeños cuerpos

Jane X. Luu y David C. Jewitt

Tras el descubrimiento de Plutón en el año 1930, la posibilidad de encontrar un décimo planeta en órbita alrededor del Sol despertó el interés de muchos astrónomos. Oculto por las enormes distancias del espacio interplanetario, el misterioso "planeta X" podría haber escapado incluso a los telescopios más potentes, o al menos así se argüía. Pero los años pasaron sin que se le encontrase, y la mayoría aceptó que el sistema solar se limitaba al conjunto de nueve planetas que nos resulta familiar.

Sin embargo, en 1992, cuando identificamos un pequeño cuerpo celeste de sólo unos cientos de kilómetros de diámetro, más alejado del Sol que los planetas conocidos, muchos se replantearon muy seriamente sus ideas sobre el sistema solar. Desde entonces, hemos hallado una treintena larga de cuerpos similares que describen sus órbitas a través del sistema solar exterior. Es probable que haya una cohorte entera de objetos así. En su conjunto constituirían el cinturón de Kuiper, región del sistema solar bautizada en honor al astrónomo estadounidense de origen holandés Gerard P. Kuiper, quien, en 1951, defendió su existencia.

1. LOS CONFINES DEL SISTEMA SOLAR han preservado la materia primordial subsistente desde los tiempos en que se formaron los planetas. En esas épocas arcanas, Plutón (*en primer plano*) podría haber capturado a su satélite Caronte (*derecha*), al tiempo que catapultaba a un tercer cuerpo (*arriba*) hacia el espacio. En aquellos momentos la región estaría llena de polvo y abundaría en objetos acrescentes del cinturón de Kuiper.



2. LA GRAVEDAD DE LOS PLANETAS barrió durante las primeras etapas del sistema solar los pequeños cuerpos situados dentro de la órbita de Neptuno. Algunos de estos objetos se abalanzaron en dirección al Sol, otros se dispararon al exterior, hacia la lejana nube de Oort (*no figura en la ilustración*).

¿Qué llevó a Kuiper a creer, hace casi medio siglo, que el disco del sistema solar estaba poblado por numerosos cuerpos de pequeño tamaño que giran alrededor del Sol a enorme distancia de éste? Desarrolló la idea a partir de los datos fundamentales relativos a ciertos cometas, los densos conglomerados de hielo y roca que regularmente se precipitan hacia el Sol desde los confines del sistema solar. Muchos de estos objetos, pequeños en comparación, ofrecen espectaculares apariciones periódicas cuando su temperatura, por la acción de los rayos solares, aumenta lo suficiente para que el polvo y el gas de su superficie se disipen y se creen los halos luminosos (las grandes "comas") y las largas colas.

Se sabe desde hace mucho que estos cometas activos son, a escala astronómica, unos recién llegados al sistema solar interior. Un cuerpo como el cometa Halley, que se deja ver cada 76 años, pierde aproximadamente una diezmilésima de su masa cada vez que se acerca al Sol. Sobrevivirá, pues, sólo unas 10.000 órbitas, medio millón de años quizá. La creación de los cometas de este tipo se remonta a la del sistema solar, hace unos 4500 millones de años, y a estas alturas ya tendrían que haber perdido sus elementos volátiles y no debería quedar de ellos más que unos núcleos rocosos e inactivos o unos difusos torrentes de polvo. Entonces, ¿por qué hay todavía tantos cometas que deslumbran con su vistosidad a quienes los contemplan?

Luces de guía

Los cometas que ahora son activos se formaron en los albores del sistema solar, pero permanecieron en estado de inactividad, la mayoría conservados en la nube de Oort, un congelador celeste. El astrónomo holandés Jan H. Oort propuso en 1950 la existencia de esta esfera de material cometario. Sostenía que su diámetro era de unas 100.000 unidades astronómicas (una UA es la distancia igual a la separación promedio entre la Tierra y el Sol, unos 150 millones de kilómetros) y que con-

SOL
NEPTUNO
100 UNIDADES ASTRONOMICAS

3. PUEDE QUE INCONTABLES OBJETOS del cinturón de Kuiper recorran sus órbitas lejos del Sol, pero no todos pueden observarse desde la Tierra. Los cuerpos (*círculos*) que cabe esperar razonablemente que descubra el telescopio del Mauna Kea, en Hawai, están situados por lo normal cerca del borde interno del cinturón, tal como muestra esta simulación por ordenador de la distribución de la materia distante.

tenía cientos de miles de millones de cometas. Según la idea de Oort, el tirón gravitatorio aleatorio de las estrellas que pasan cerca de la nube desplaza la órbita estable de algunos de los cometas situados en su parte externa y desvía de forma gradual el rumbo de los mismos hasta que se precipitan hacia el Sol.

Durante casi 50 años, la hipótesis de Oort ha explicado muy bien el tamaño y la orientación de las trayectorias que siguen los cometas de período largo (los que tardan más de 200 años en dar un giro alrededor del Sol). La dirección por la que estos cuerpos entran en la región planetaria es aleatoria, conforme cabía esperar de su origen en un repositorio, como la nube de Oort, esférico. Sin embargo, esta hipótesis no ofrece explicación alguna de los cometas de período corto, que describen órbitas más pequeñas e inclinadas sólo un poco con respecto al plano orbital de la Tierra, la eclíptica.

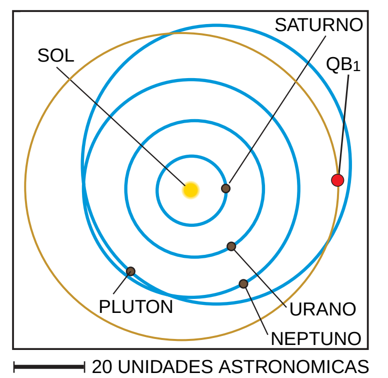
La mayoría creía que los cometas de período corto describieron en un principio inmensas órbitas orientadas al azar (lo que hacen hoy los cometas de período largo) y que la gravedad de los planetas (principalmente Júpiter) los fue desviando hasta que adoptaron la configuración orbital que tienen ahora. No todos aceptaban esta idea. Ya en 1949, Kenneth Essex Edgeworth, un investigador irlandés de alta alcurnia que no pertenecía a ninguna institución científica, escribió un artículo riguroso en el que predecía la existencia de un anillo fino de cometas en el sistema solar exterior. Kuiper también estudió la existencia de un cinturón de cometas en su artículo de 1951, sin hacer referencia al trabajo anterior de Edgeworth.

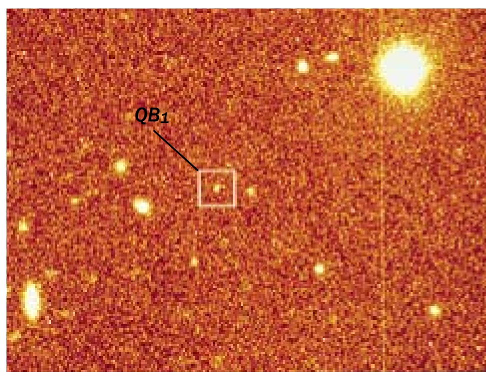
Argumentó Kuiper —como otros— que el disco del sistema solar no podía terminar bruscamente en las cercanías de Neptuno o Plutón (que pugnan por el honor de ser el planeta más distante del Sol). Su idea era que, más allá de Neptuno y Plutón, había un cinturón de materia residual procedente de la formación de los planetas. La densidad de materia en esa región exterior sería tan pequeña que habría impedido la generación, por acreción, de cuerpos planetarios, pero sí objetos menores, de un tamaño parecido quizás al de los asteroides. Como esos residuos dispersos del material primigenio estarían muy alejados del Sol, tendrían temperaturas superficiales bajas; sería, pues, probable que los objetos remotos se hallaran compuestos de agua helada y de varios gases congelados. Se parecerían mucho, si es que no eran idénticos, a los núcleos de los cometas.

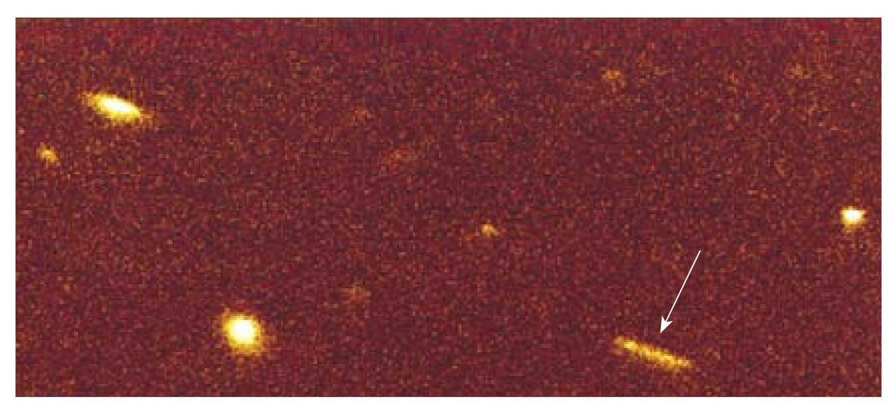
La hipótesis de Kuiper languideció hasta que, en los años setenta, Paul C. Joss, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, puso en entredicho que la gravedad de Júpiter fuera capaz, en la práctica, de transformar los cometas de período largo en cometas de período corto. Señaló que la probabilidad de que se verificase la captura gravitatoria era tan nimia, que el elevado número de cometas de período corto existente en la actualidad no tendría, sencillamente, ni pies ni cabeza. Pero otros investigadores no lograron confirmar este resultado, y se siguió aceptando que la nube de Oort era la fuente de los cometas, fueran de período corto o largo.

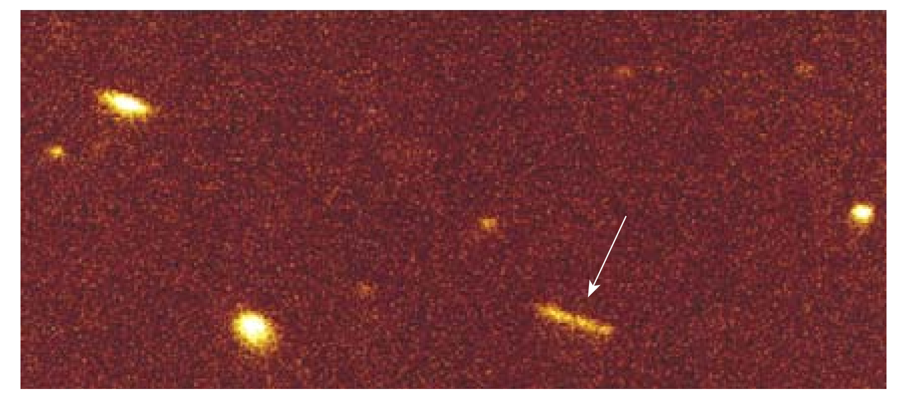
Cometas de período corto

Pero Joss había sembrado la semilla de la duda, y poco a poco otros astrónomos fueron poniendo en cuestión la teoría comúnmente aceptada. En 1980, Julio A. Fernández (adscrito entonces al Instituto Max Planck de Aeronomía, en Katlenburg-Lindau) hizo unos cálculos que sugerían que los cometas de período corto procedían de la fuente transneptuniana









4. LAS SECUENCIAS de exposiciones CCD, realizadas en 1992, revelan claramente el objeto QB_1 del cinturón de Kuiper sobre un fondo de estrellas fijas (*centro y abajo*). Estas dos imágenes solamente cubren una pequeña parte del cuadro completo obtenido con el CCD (*arriba, a la derecha*), que los autores tuvieron que analizar antes de identificar QB_1 (*flechas*) y determinar su órbita (*arriba, a la izquierda*).

de Kuiper. En 1988, Martin J. Duncan, de la Universidad de Toronto, Thomas Quinn y Scott D. Tremaine (ambos del Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica), valiéndose de simulaciones por ordenador, investigaron de qué manera podrían los gaseosos planetas gigantes capturar cometas. Como Joss, vieron que el proceso funcionaba bastante mal, y dudaron de la veracidad de esa arraigada explicación sobre el origen de los cometas de período corto. E hicieron además que sonase una nueva alarma. Sus estudios indicaban que los pocos cometas que la fuerza gravitatoria de los grandes planetas podría arrancar de la nube de Oort deberían moverse en un enjambre esférico; sin embargo, las órbitas de los cometas de período corto tienden a estar en planos cercanos a la eclíptica.

Duncan, Quinn y Tremaine concluyeron que las órbitas originales de los cometas de período corto estuvieron sólo ligeramente inclinadas con respecto al plano de la eclíptica y pertenecieron quizás a un cinturón estrecho de cometas en el sistema solar exterior. Pero la hipótesis del cinturón de Kuiper no quedaba exenta de toda duda. Para que los cálculos fuesen factibles, habían multiplicado por 40 las masas de los planetas exteriores; de esa forma crecía la atracción gravitatoria y se aceleraba la evolución orbital que deseaban examinar. Otros astrofísicos se preguntaban si esta artimaña no podría haber conducido a una conclusión errónea.

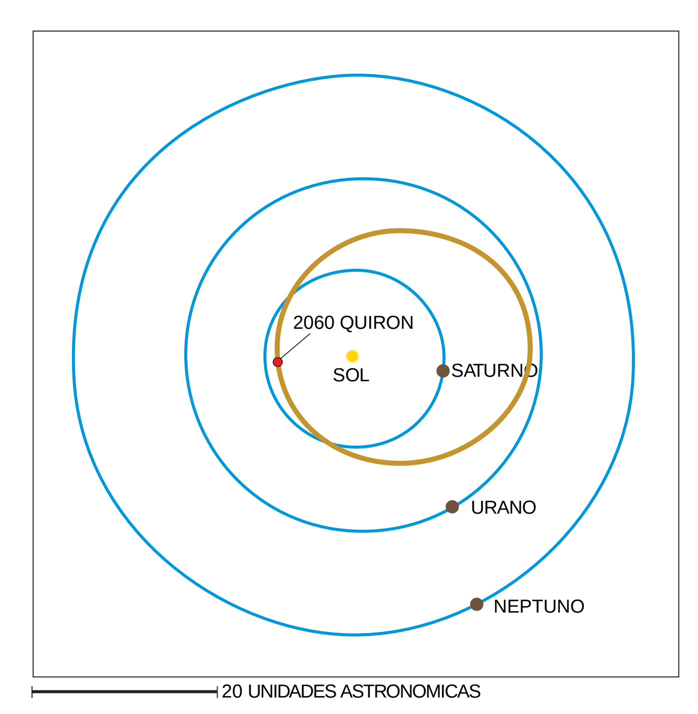
¿Por qué no mirar, simplemente?

Antes incluso de que Duncan, Quinn y Tremaine publicaran su trabajo, nos preguntábamos si el sistema solar exterior estaba realmente vacío, si no estaría repleto de pequeños cuerpos aún no vistos. Emprendimos en 1987 un rastreo telescópico para afrontar con rigor la cuestión. Ibamos a buscar, con la poca luz solar que nos llegaría reflejada desde tamañas distancias, cualquier objeto que pudiera haber en el sistema solar exterior. Al principio usamos placas fotográficas, pero pronto vimos que un detector electrónico (un dispositivo acoplado a la carga, o CCD), instalado en uno de los mayores telescopios que hay, sería más prometedor.

Llevamos a cabo la mayor parte de nuestro estudio con el telescopio de 2,2 metros de la Universidad de Hawai, en el Mauna Kea. La estrategia consistía en utilizar una serie de CCD para tomar cuatro exposiciones consecutivas de 15 minutos de una zona determinada del cielo, y, por medio de un ordenador, exhibir las imágenes de la secuencia en rápida sucesión, un proceso que los astrónomos denominan “parpadeo”. Un objeto que se desplazara algo en la imagen sobre el fondo de estrellas (a las que se ve inmóviles) manifestaría que era miembro del sistema solar.

Continuamos nuestra búsqueda durante cinco años, sin obtener resultados positivos. Pero la técnica a nuestro alcance mejoraba tan rápidamente, que nos fue fácil mantener el entusiasmo (si no la subvención) en la constante persecución de nuestra presa escurridiza. El 30 de agosto de 1992 tomábamos la tercera exposición de una secuencia de cuatro, mientras “parpadeaban” las dos primeras imágenes en el ordenador. Nos dimos cuenta de que una débil “estrella” había cambiando de posición ligeramente entre los cuadros. Nos quedamos mudos. El movimiento era muy sutil, pero parecía claro. Al comparar las dos primeras imágenes con la tercera, comprendimos que habíamos encontrado algo fuera de lo común. Su lento movimiento por el cielo indicaba que el objeto recién descubierto podría estar allende incluso de los puntos más remotos de la órbita de Plutón. Con todo, aún nos quedaba la sospecha de que el misterioso objeto fuese en realidad un asteroide cercano a la Tierra que se desplazara paralelamente a ésta (lo que también causaría un movimiento aparente lento). Las mediciones realizadas después descartaron tal posibilidad.

Volvimos a observar este cuerpo tan curioso las dos noches siguientes y obtuvimos medidas precisas de su posición, brillo y color. Comunicamos los datos a Brian G. Marsden, director de la Oficina Central de Telegramas Astronómicos de la Unión Astronómica Internacional, en el Observatorio Smithsoniano de Astrofísica en Cambridge, Massachusetts. Sus cálculos indicaron que el objeto





5. QUIRON 2060 podría haber escapado del cinturón de Kuiper hacia su órbita actual, que cruza órbitas planetarias (*izquierda*). Aunque bastante débil, la sutil incandescencia que lo rodea (*página siguiente*) emparienta este objeto con otros cuerpos “activos”, como el cometa Peltier (*arriba*).

que habíamos descubierto giraba alrededor del Sol a una gran distancia (40 UA), sólo un poco menos de lo que habíamos supuesto inicialmente. Le asignó al cuerpo recién descubierto una denominación formal, no muy agraciada que se diga, basada en la fecha del descubrimiento: "1992 QB_1". Preferíamos que se le llamase "Smiley", como el espía de John Le Carré, pero la conservadora comunidad astronómica no hizo suyo el nombre.

JANE X. LUU y DAVID C. JEWITT llegaron al estudio de la astronomía por caminos diferentes. Para Jewitt la astronomía fue una pasión que desarrolló en su juventud en Inglaterra. La infancia de Luu estuvo presidida por preocupaciones más prácticas: refugiada vietnamita, tuvo que aprender inglés y adaptarse al estilo de vida del sur de California. Se enamoró de la astronomía casi por accidente, durante un verano que pasó en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena. Luu y Jewitt empezaron a trabajar juntos en 1986, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde Jewitt era profesor y Luu estudiante de doctorado. Jewitt se trasladó a la Universidad de Hawai en 1988. Descubrieron el primer objeto del cinturón de Kuiper cuando Luu disfrutaba de una plaza posdoctoral en el Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. En 1994 Luu ingresó en el claustro de la Universidad de Harvard.

Nuestras observaciones demostraron que QB_1 refleja una luz rica en matices rojos en comparación con la luz solar que lo ilumina. Esta coloración tan poco común sólo tiene parangón con otro objeto del sistema solar: un asteroide o cometa muy peculiar llamado Pholus 5145. Se atribuye el tono rojizo de Pholus 5145 a la presencia en su superficie de materia oscura rica en carbono. La similitud entre QB_1 y Pholus 5145 hizo que nos apasionásemos aún más durante los primeros días posteriores al descubrimiento. El objeto que acabábamos de localizar podría estar recubierto de algún tipo de material de color rojo donde abundasen los compuestos orgánicos. ¿Qué tamaño tenía este nuevo y bermejo mundo? En función de nuestra serie de mediciones preliminares, calculamos que QB_1 medía entre 200 y 250 kilómetros, unas 15 veces el núcleo del cometa Halley.

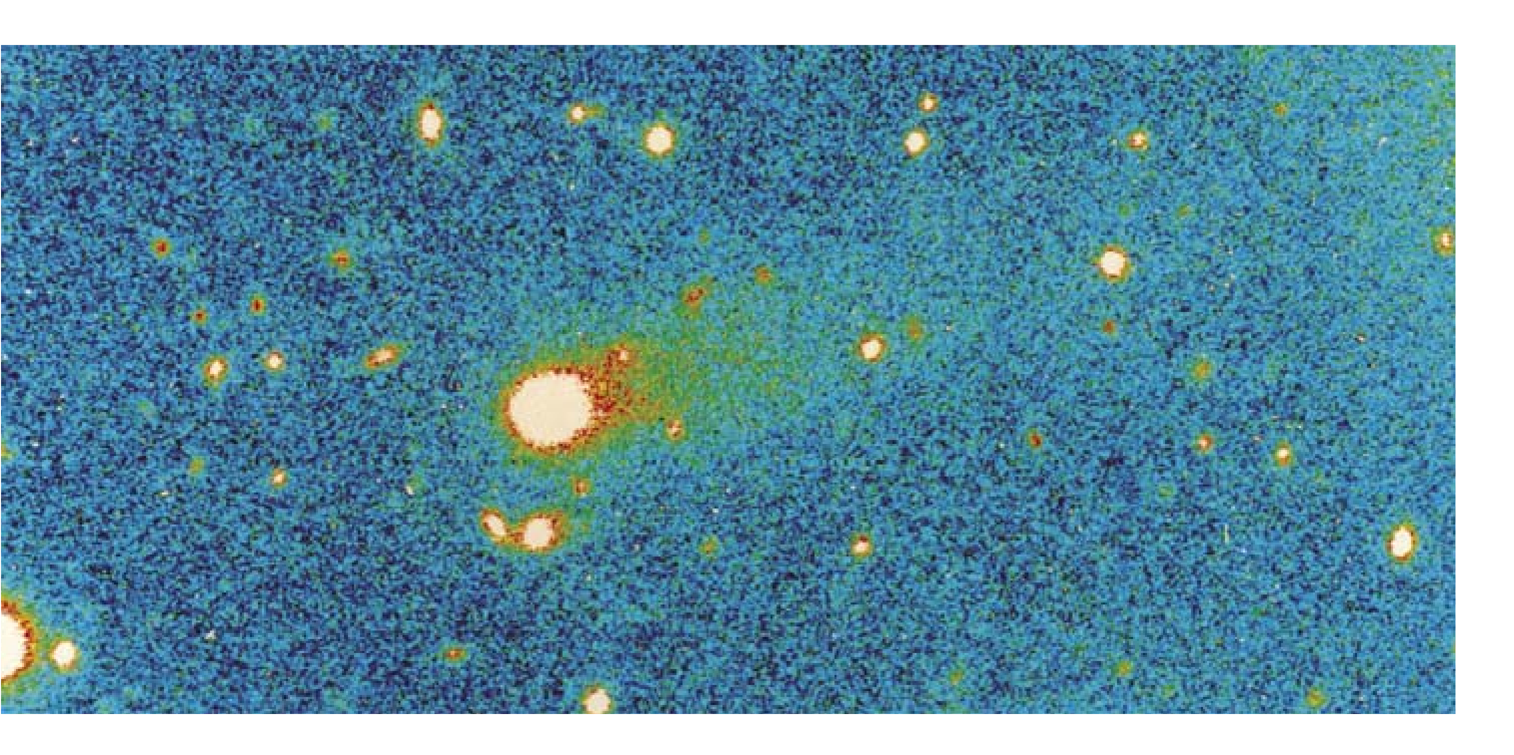
Al principio, no estaban muy seguros algunos de que nuestro descubrimiento de QB_1 significara realmente que hubiese una población de objetos en el sistema solar exterior, como habían vaticinado Kuiper y otros autores. Pero este escepticismo empezó a desvanecerse cuando encontramos un segundo cuerpo en marzo de 1993. Este objeto se halla tan lejos del Sol como QB_1, aunque en el lado opuesto del sistema solar. Varios grupos de investigación se han sumado durante los últimos tres años a la tarea y se han sucedido los descubrimientos. El número de objetos conocidos del cinturón transneptuniano de Kuiper es actualmente de 32.

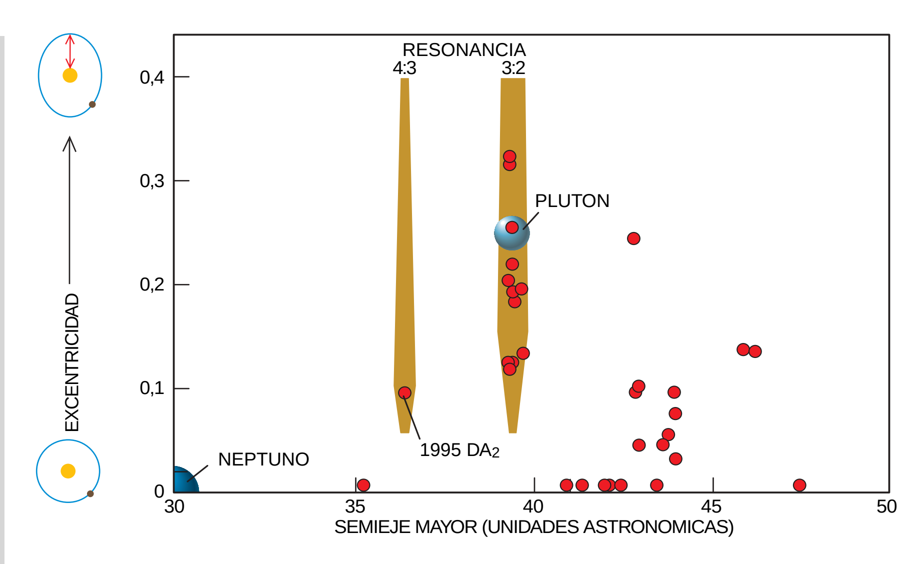
Comparten una serie de características. Por ejemplo, todos ellos se alojan allende la órbita de Neptuno, lo que sugiere que este planeta podría definir el borde interior del cinturón. Y sus órbitas están sólo un poco inclinadas respecto a la eclíptica, lo que concuerda con la existencia de un cinturón aplanado de cometas. Los objetos que conforman el cinturón de Kuiper son millones de veces más débiles de lo que puede observarse a simple vista. Los diámetros de los 32 objetos van de los 100 a los 400 kilómetros; son bastante menores que Plutón (2300 kilómetros de diámetro) y su satélite Caronte (1100 kilómetros de diámetro).

Almacenamiento de cometas en frío

El muestreo actual es aún muy modesto, pero el número de nuevos cuerpos encontrados hasta ahora en el sistema solar basta para confirmar la existencia del cinturón de Kuiper sin ningún género de dudas. También parece claro que el cinturón cuenta con una población considerable; nosotros calculamos que debe contener al menos 35.000 objetos con diámetros superiores a los 100 kilómetros. Por tanto, su masa total es probablemente cientos de veces mayor que la del cinturón de asteroides situado entre las órbitas de Marte y Júpiter.

Puede que el cinturón de Kuiper abunde en materia, pero ¿es la fuente de donde salen los cometas de pe-





6. LA RESONANCIA DEL MOVIMIENTO MEDIO determina el tamaño y la forma de las órbitas de muchos de los objetos del cinturón de Kuiper. Los parámetros que describen las órbitas son la excentricidad (desviación de la forma circular) y el semieje mayor (*flecha roja*). Al igual que Plutón, alrededor de la mitad de los cuerpos del cinturón de Kuiper conocidos hasta ahora (*puntos rojos*) dan dos vueltas alrededor del Sol mientras Neptuno describe tres órbitas: una resonancia orbital de 3:2. La órbita del objeto DA_2 1995 cae en otra de las resonancias. Renu Malhotra, del Instituto Lunar y Planetario de Houston, sugiere que este comportamiento refleja la evolución primitiva del sistema solar, cuando se produjo la expulsión de numerosos cuerpos pequeños y los planetas principales se apartaron del Sol. Durante estos movimientos hacia el exterior Neptuno tuvo la posibilidad de atraer a Plutón y a un conjunto de cuerpos menores hasta situarlos en las órbitas resonantes que se observan ahora.

ríodo corto y vida breve? Matthew J. Holman y Jack L. Wisdom, ambos del Instituto de Tecnología de Massachusetts, abordaron el problema mediante simulaciones por ordenador. Demostraron que en un período de 100.000 años la influencia gravitatoria de los planetas gaseosos gigantes, es decir, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, expulsa a los cometas que giran alrededor del Sol en su entorno y los envía a los confines del sistema solar. Pero un alto porcentaje de cometas transneptunianos logra burlar ese destino y permanecer en el cinturón pasados incluso 4500 millones de años. Por tanto, es probable que los objetos del cinturón de Kuiper instalados a más de 40 UA del Sol hayan permanecido en órbitas estables desde la formación del sistema solar.

Se cree también que el cinturón de Kuiper ha tenido la masa suficiente para proporcionar todos los cometas de período corto que se hayan formado. Parece, pues, un excelente candidato a “almacén de cometas”. Y el mecanismo de transferencia al exterior del repositorio ya se conoce bien. Las simulaciones por ordenador demuestran que la gravedad de Neptuno erosiona muy lentamente el borde interior del cinturón (la región situada a menos de 40 UA del Sol) y lanza los objetos de esa zona hacia el interior del sistema solar. Al final, muchos de estos pequeños objetos, convertidos en cometas, se irán quemando poco a poco. Algunos, como el Shoemaker-Levy 9, que chocó contra Júpiter en julio de 1994, podrían terminar sus vidas súbitamente al colisionar con un planeta o quizá contra el Sol. Otros caerán en un “tirachinas gravitatorio” que los disparará hacia el remoto espacio interestelar.

Si el cinturón de Kuiper es efectivamente la fuente de los cometas de período corto, surge otra pregunta natural: en estos momentos, ¿hay cometas del cinturón que se encaminen hacia el interior del sistema solar? Los Centauros, un grupo de objetos al que pertenece el cuerpo extremadamente rojo Pholus 5145, podrían encerrar la respuesta. Viajan describiendo unas órbitas enormes, que cruzan las de los planetas y son esencialmente inestables. Los Centauros sólo permanecen entre los planetas gigantes algunos millones de años antes de que las interacciones gravitatorias los expulsen del sistema solar o los sitúen en órbitas más restringidas.

Como su vida orbital es mucho más corta que la edad del sistema solar, los Centauros no pudieron

engendrarse donde se encuentran actualmente. Sin embargo, la forma de sus órbitas hace que sea virtualmente imposible deducir su lugar de origen con una seguridad total. No obstante, la reserva más cercana (y más probable) es el cinturón de Kuiper. Los Centauros, pues, serían cometas de transición, antiguos objetos del cinturón de paso hacia unas vidas cortas, aunque espectaculares, en el sistema solar interior. La prueba más fehaciente en favor de esta hipótesis proviene de un Centauro en particular: Quirón 2060. Pese a que sus descubridores creyeron al principio que se trataba de un asteroide poco común, ahora ha quedado establecido que Quirón 2060 es un cometa activo, con un coma débil y persistente.

Mientras se persevera en el estudio del cinturón de Kuiper, algunos se preguntan si podría haber generado otros objetos y no sólo cometas. ¿Es una coincidencia que Plutón, su satélite Caronte y Tritón, satélite de Neptuno, se encuentren muy cerca del cinturón de Kuiper? El interrogante brota ante el hecho de que compartan Plutón, Caronte y Tritón propiedades básicas y, sin embargo, difieran drásticamente de sus vecinos.

Un trío peculiar

Plutón y Tritón, por ejemplo, son mucho más densos que los planetas gigantes gaseosos del sistema solar exterior. También sus movimientos son bastante extraños. Tritón gira alrededor de Neptuno en sentido "retrógrado", el opuesto a la dirección orbital de todos los planetas y la mayoría de los satélites. La órbita de Plutón está muy inclinada respecto a la eclíptica, y dista tanto de ser circular que llega incluso a cruzar la órbita de Neptuno. Sin embargo, Plutón está protegido de una posible colisión con el planeta mayor por una relación orbital especial: una resonancia del movimiento medio 3:2. Dicho de modo más simple, cada tres órbitas de Neptuno alrededor del Sol, Plutón da dos.

Las piezas de este rompecabezas celeste encajarían si supusiésemos que Plutón, Caronte y Tritón son los últimos supervivientes de un conjunto, mucho mayor en otro tiempo, de objetos de un tamaño similar. S. Alan Stern, del Instituto de Investigación del Sudoeste en Boulder, presentó la idea en 1991. Estos tres cuerpos podrían haber sido arrastrados por Neptuno, que capturó a Tritón y ligó Plutón —quizá con Caronte de remolque— hasta situarlos en su resonancia orbital actual.

Resulta interesante que las resonancias orbitales influyan también en la posición de muchos objetos del cinturón de Kuiper. La mitad de los cuerpos descubiertos presentan la misma resonancia orbital 3:2 que Plutón y, como éste, podrían describir sus órbitas con tranquilidad durante miles de millones de años. (La resonancia impide que Neptuno se acerque demasiado al cuerpo menor y perturbe su órbita). Hemos llamado "plutinos" (pequeños plutones) a estos objetos del cinturón. A juzgar por la pequeña fracción del firmamento que hemos examinado nosotros, calculamos que hay varios miles de plutinos de más de 100 kilómetros de diámetro.

Los recientes descubrimientos de objetos del cinturón de Kuiper proporcionan una nueva perspectiva del sistema solar exterior. Ahora Plutón nos parece especial sólo porque es mayor que cualquier otro cuerpo del cinturón de Kuiper. Incluso podríamos dudar si Plutón merece la categoría de planeta con todas las de la ley. Por ironía de las cosas, una línea de investigación que quería hallar un décimo planeta podría, en cierto sentido, haber dejado su número en sólo ocho. Esta paradoja y las numerosas y apasionantes observaciones que hemos hecho de los objetos del cinturón de Kuiper nos recuerdan que el sistema solar guarda incontables sorpresas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ORIGIN OF SHORT PERIOD COMETS. Martin Duncan, Thomas Quinn y Scott Tremaine, en *Astrophysical Journal*, vol. 328, págs. L69-L73, 15 de mayo de 1988.

THE KUIPER BELT OBJECTS. J. X. Luu, en *Asteroids, Comets, Meteors* 1993. Dirigido por A. Milani, M. Di Martino y A. Cellino. Kluwer Academic Publishers, 1993.

THE SOLAR SYSTEM BEYOND NEPTUNE. D. C. Jewitt y J. X. Luu en *Astronomical Journal*, vol. 109, número 4, págs. 1867-1876, abril de 1995.

THE ORIGIN OF PLUTO'S ORBIT: IMPLICATIONS FOR THE SOLAR SYSTEM BEYOND NEPTUNE. Renu Malhotra en *Astronomical Journal*, vol. 110, págs. 420-429, julio de 1995.

Indicadores internos del riesgo de cáncer

La epidemiología molecular, una disciplina en pleno desarrollo, busca indicadores biológicos que revelen las posibilidades de padecer cáncer. Su avance dará mayor consistencia a las medidas preventivas

Frederica P. Perera

Imaginemos que, mucho antes de que aparecieran los tumores, un laboratorio pudiera detectar indicios biológicos —biomarcadores— del ataque sufrido en los tejidos por agentes específicos de cáncer o, peor, del inicio de cambios precancerosos. Y supongamos que fuera posible identificar biomarcadores de especial vulnerabilidad a los efectos de los carcinógenos ambientales. (Entre estos agentes figuran el humo del tabaco, la radiación, ciertos microorganismos y los productos químicos, naturales o sintéticos, presentes en nuestro alimento, el agua y el aire.) El descubrimiento de esos marcadores ayudaría a prevenir el cáncer en las personas afectadas, porque sabrían al menos qué carcinógenos deberían evitar por encima de todo. El uso de marcadores para poner de manifiesto el riesgo incrementado que corren ciertos grupos, como los niños, serviría quizá también para que los responsables de la sanidad pública adoptaran nuevas medidas orientadas a reducir las exposiciones cuyo control no está en manos del individuo.

Guiados por tales propósitos, los investigadores de una disciplina floreciente denominada epidemiología molecular han iniciado la búsqueda de biomarcadores que permitan reconocer la existencia de un riesgo redoblado de desarrollar cáncer. Se trata de una especialidad aún joven. No se puede todavía rastrear un elenco de marcadores en un individuo y ofrecerle una valoración significativa de su probabilidad de adquirir cáncer. Pero estas pruebas serán factibles algún día. (El retraso no es malo en absoluto. Las personas que se sometan a estas pruebas deberán estar celosamente protegidas contra la discriminación practicada por las compañías de seguros y los empresarios, pero todavía no existen las garantías necesarias.)

Mientras eso llega, los datos disponibles no dejan de proporcionar otro tipo de información. En particular, corroboran la idea de que los métodos actuales de determinación de los niveles “aceptables” de exposición a los carcinógenos ambientales infravaloran el peligro real que corren algunos segmentos de la sociedad. Cabe también esperar que los biomarcadores comiencen pronto a prestar su ayuda a los investigadores interesados en desarrollar nuevos enfoques para prevenir el cáncer. En vez de esperar años o decenios para saber si la exposición humana a ciertos productos químicos incrementa las tasas de cáncer o si una intervención experimental reduce su incidencia, podrían conseguirse respuestas bastante rápidas mediante el control selectivo de signos de lesión precancerosa en el organismo.

La epidemiología molecular se parece a la epidemiología clásica, de la que, no obstante, difiere en importantes aspectos. Combina las herramientas de la epidemiología estándar (como la incidencia, los cuestionarios y el control de la exposición) con las finas técnicas de

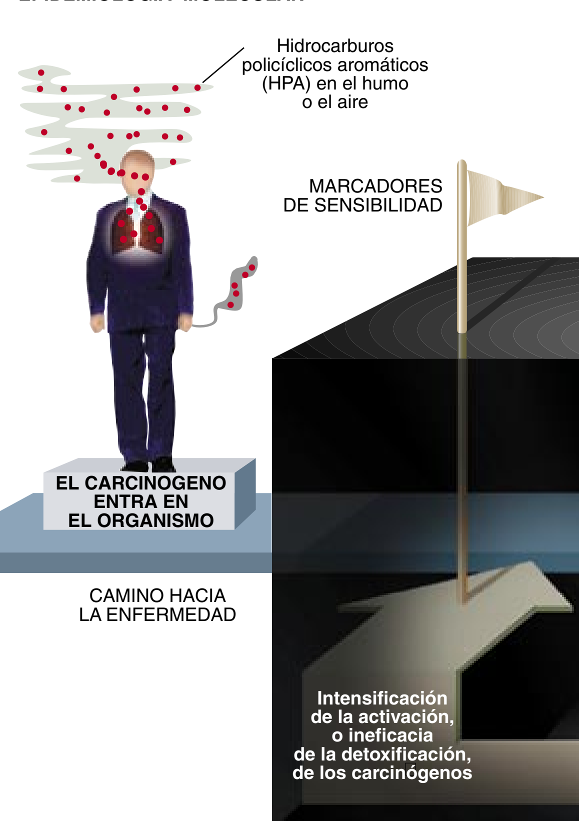
FREDERICA P. PERERA ha sentado las bases de la aplicación de los métodos de la epidemiología molecular al estudio del cáncer. Es profesora en la Facultad de Salud Pública de Columbia y directora asociada del Centro Presbitariano del Cáncer de Columbia. Se licenció en Radcliffe en 1963 y se doctoró en salud pública por Columbia en 1981.

EPIDEMIOLOGIA CLASICA



POBLACION EXPUESTA AL HUMO DEL TABACO O A LA CONTAMINACION AMBIENTAL

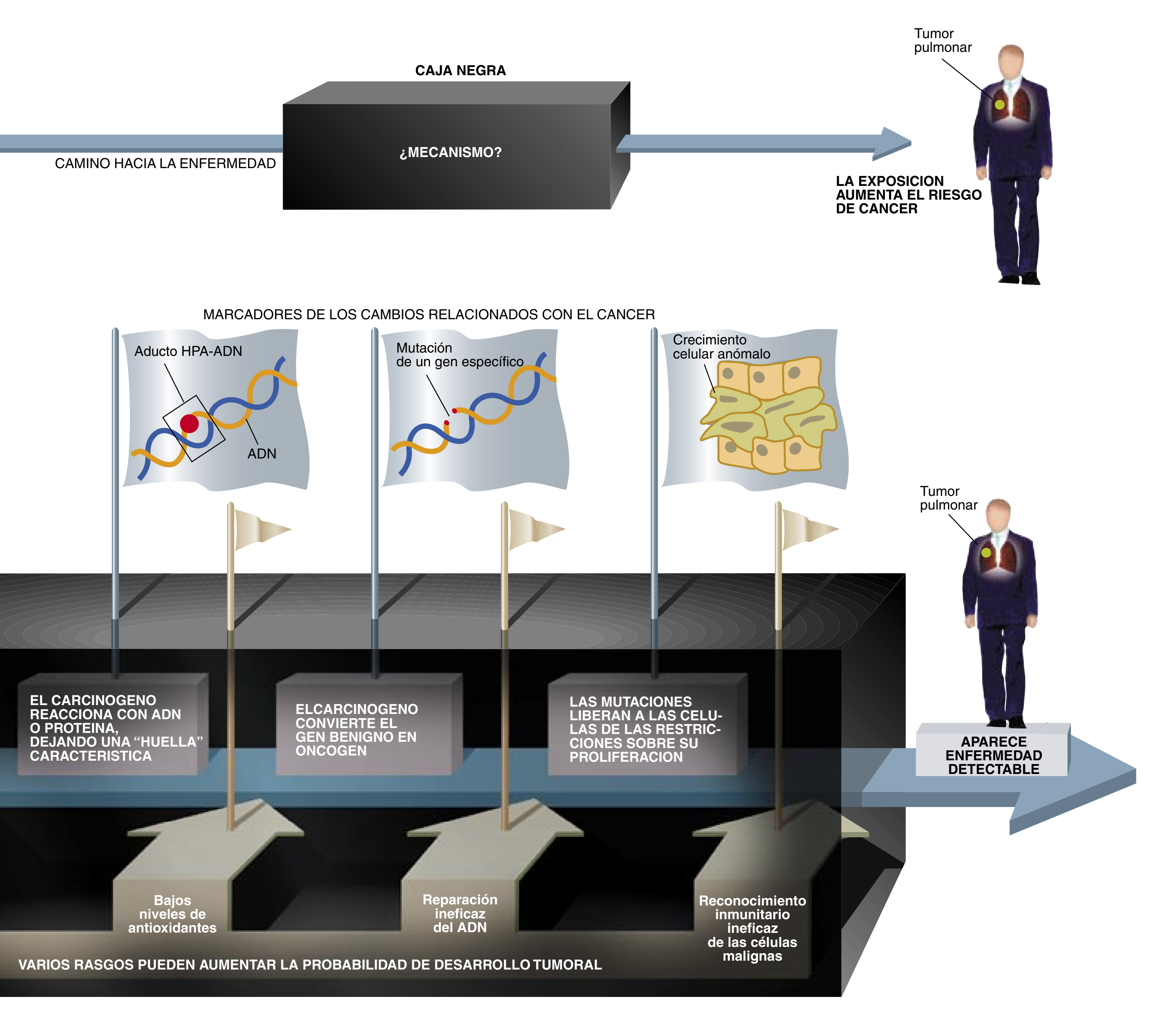
EPIDEMIOLOGIA MOLECULAR

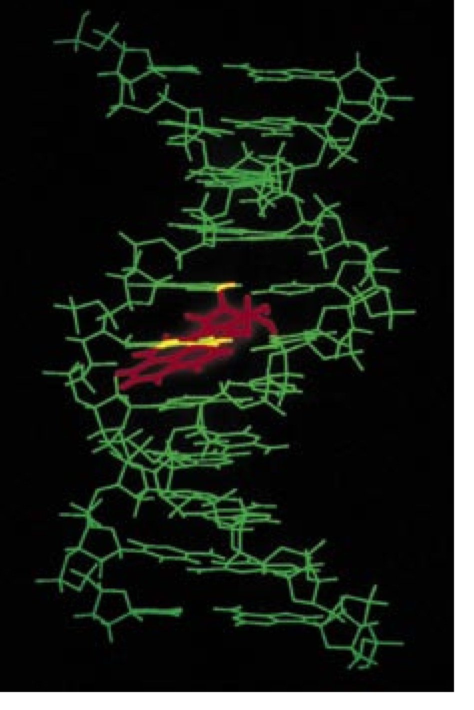


laboratorio de la biología molecular. El propio enfoque tradicional ha contribuido de manera destacada a la comprensión del riesgo de cáncer. Por ejemplo, la epidemiología tradicional ha demostrado que las dietas ricas en grasas pueden intervenir en el cáncer de colon, ha vinculado el benceno con la leucemia y ha establecido que el humo del tabaco multiplica las posibilidades de adquirir un cáncer de pulmón. Incluso ha cuantificado los riesgos: es probable que uno de cada 10 grandes fumadores desarrolle cáncer de pulmón. Pero esa investigación nada revela sobre el continuo preciso de acontecimientos que se suceden de la exposición a la enfermedad manifiesta. La epidemiología molecular aspira a descubrir los episodios precancerosos críticos que tienen lugar en el interior del organismo y a identificar señalizadores biológicos, mensurables, que denuncien su existencia.

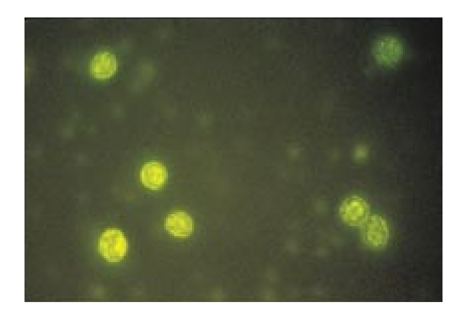
En su labor, la epidemiología molecular extrae información del cono-

1. LA EPIDEMIOLOGIA molecular proporciona una clase de información inalcanzable por los métodos de la epidemiología clásica. Se ilustra aquí mediante el ejemplo del cáncer de pulmón. La epidemiología clásica (*arriba*) identifica los factores que aumentan el riesgo de cáncer (como la inhalación de aire contaminado o de humo de tabaco), pero no aborda el proceso a través del cual se produce la enfermedad. La epidemiología molecular (*abajo*) mira en el interior de la caja negra para descubrir las etapas que se recorren desde las exposiciones a los carcinógenos hasta la enfermedad. Identifica también los signos biológicos, o biomarcadores, que indican un mayor riesgo. Algunos marcadores (*banderas rectangulares*) reflejan exposición o progreso a lo largo del camino que conduce al cáncer. Otros señalan la propensión congénita o adquirida a los efectos de los carcinógenos (*estandartes pequeños*). Detectando esos marcadores, conoceremos los grupos o individuos más necesitados de medidas preventivas.









2. LOS TRABAJADORES DE LAS FUNDICIONES (*fotografía*), los fumadores y las personas que viven en regiones muy industrializadas respiran a menudo elevados niveles de productos de combustión, entre ellos los carcinógenos conocidos como hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA). Las "huellas" de esta exposición pueden detectarse en el pulmón y las células sanguíneas, en forma de aductos HPA-ADN: complejos lesivos para el ADN que se producen cuando dichos hidrocarburos (*en rojo en la imagen de ordenador de la izquierda*) se unen al ADN (*verde*). En la micrografía de la derecha los aductos aparecen de color verde fluorescente en los leucocitos de un individuo expuesto.

cimiento creciente sobre el desarrollo del cáncer, al tiempo que contribuye a ampliarlo. Por lo que sabemos, las neoplasias malignas surgen en general como consecuencia de la acumulación aditiva de daño contra los genes de una célula. Cuando los defectos acumulados terminan por liberar a la célula de las restricciones impuestas por la naturaleza a su multiplicación, se desarrollan los tumores y, con demasiada frecuencia, se produce la invasión del tejido circundante y se establecen satélites mortíferos (las metástasis) en otros lugares del organismo.

El descubrimiento de que el daño genético constituya la razón fundamental del cáncer no significa que la mayoría de las neoplasias malignas sean consecuencia de la herencia de genes defectuosos. En Estados Unidos la herencia no justifica más allá del 5 por ciento de todos los cánceres. Las alteraciones genéticas que transforman una célula normal en otra cancerosa suelen producirse en el transcurso de la vida, a través de interacciones complejas entre los carcinógenos y los sistemas del organismo que tienen por misión luchar contra ellos. (Entre los carcinógenos culpables se encuentran los que hay en el ambiente y los que, como los oxidantes, nuestro organismo genera durante el metabolismo normal.) De hecho, el que un agente contribuya al cáncer no sólo depende de la cuantía de la exposición del sujeto, sino también de la eficacia de las respuestas defensivas del organismo (que varían de un individuo a otro, a veces notablemente).

A principios de los años ochenta tracé, con mis colegas de la Universidad de Columbia, las líneas básicas para las investigaciones epidemiológicas moleculares del cáncer, tras haber detectado un nuevo marcador molecular que indicaba una lesión en el ADN de tejido humano causada por un carcinógeno específico. Expuesto de una manera sencilla, los epidemiólogos moleculares sondean muestras de tejido humano en busca de marcadores biológicos que reflejen la exposición a un carcinógeno, una lesión inductora de cáncer en las células o los tejidos, o una vulnerabilidad especial a los carcinógenos. A través de una serie de etapas, se contrastan los marcadores, esto es, se ponen a prueba para demostrar que su presencia denuncia un riesgo incrementado de cáncer mucho antes de la aparición de los síntomas clínicos. Los marcadores válidos (los que superan diversas pruebas) pueden ponderarse luego en grupos seleccionados, lo que revelará la necesidad de intervenir.

Para ilustrar el planteamiento general, nos sirve la secuencia de etapas que nos llevó a encontrar un nuevo marcador y a establecer su valor potencial como signo de advertencia de un riesgo redoblado de cáncer de pulmón. En 1982, cuando trabajaba con I. Bernard Weinstein, de Columbia, y Miriam C. Poirier, del Instituto Nacional contra el Cáncer, observé que cierta clase de carcinógenos (los hidrocarburos policíclicos aromáticos [HPA]) dejaban una "huella" inequívoca en el pulmón y las células sanguíneas humanas. Estos hidrocaburos se cuentan entre los 400 productos químicos cuya capacidad carcinógena se ha demostrado en estudios humanos y animales; son productos de combustión encontrados sobre todo en el humo del tabaco, el aire contaminado y los alimentos ahumados o preparados en barbacoa o a la parrilla. La huella adoptaba la forma de una aducto, complejo que se forma cuando una sustancia química se une a una molécula biológica, por lo común, al ADN o a una proteína de la célula.

Intrigados por la presencia de aductos HPA-ADN en la sangre —fáciles de obtener en análisis clínicos—, nos propusimos determinar si esas huellas servirían de marcadores pre-

coces de una mayor propensión al cáncer de pulmón. Demostramos (mis colegas Regina M. Santella, de la Universidad de Columbia, Kari Hemminki, del Instituto Karolinska de Estocolmo, y yo misma) que las personas cuya exposición a niveles elevados de los HPA presentes en el humo del tabaco, el aire contaminado y ciertos puestos de trabajo era conocida, mostraban niveles de aductos HPA-ADN en sangre notablemente más altos que las personas cuya exposición era menor.

Por sí solos, estos hallazgos no nos permitían afirmar que la presencia de los aductos fuera indicativa de una mayor probabilidad de desarrollo de cáncer de pulmón, pero los estudios posteriores apoyaron esa hipótesis. Las personas con niveles sanguíneos elevados de complejos HPA-ADN y aductos relacionados experimentaban también un número por encima de lo normal de mutaciones genéticas y otras anomalías cromosómicas en las células sanguíneas. Dado que tales cambios son comunes en las células cancerosas, los resultados eran compatibles con la idea de que la presencia de mayores cantidades de aductos podría reflejar un riesgo añadido de desarrollar cáncer.

Obtuvimos una ulterior prueba circunstancial cuando comprobamos que las muestras sanguíneas de pacientes con cáncer de pulmón contenían aductos HPA-ADN en cuantía claramente mayor que las muestras tomadas de personas sin cáncer que habían estado expuestas a dosis similares de carcinógenos pulmonares. Tenemos ahora en estudio las muestras sanguíneas almacenadas de voluntarios participantes en una investigación a largo plazo para determinar si la presencia de los aductos HPA-ADN y otros marcadores permite predecir el cáncer de pulmón años antes de su diagnóstico.

Otros biomarcadores podrían convertirse también en indicadores de un mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer, entre ellos los hepáticos y los vesicales. Es bien sabido que la aflatoxina B1 (sustancia natural común en el maíz y los cacahuetes mohosos) puede intervenir en el cáncer hepático. Los estudios llevados a cabo en la Universidad Johns Hopkins y otros centros por el equipo de John D. Groopman han establecido que este carcinógeno deja huellas en forma de aductos en el ADN. Además, entre personas de nacionalidad china cuya orina contenía cantidades detectables de

Algunos biomarcadores en estudio

	Tejido o líquido sometido a examen	Lo que indica el marcador
Marcadores de exposición a un carcinógeno o indicativos del daño que éste provoca		
Aducto aflatoxina B1-ADN*	Orina, hígado	Lesión génica causada por la aflatoxina presente en el maíz o los cacahuetes mohosos; mayor riesgo de cáncer hepático
Aducto HPA-ADN	Sangre, pulmón, placenta	Lesión génica provocada por hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA) presentes en el aire contaminado, el lugar de trabajo o el humo del tabaco (se está investigando su idoneidad como marcador del riesgo de cáncer de pulmón)
Aducto 4-amino-bifenil-hemoglobina	Sangre	Exposición activa o pasiva al humo del tabaco (se está investigando su idoneidad como marcador de un riesgo redoblado de cáncer de vejiga)
Glicoltimina (base del ADN oxidada)	Orina	Lesión génica causada por agentes oxidantes (se está investigando su idoneidad como marcador de un mayor riesgo de cánceres diversos)
Mutación en el gen de supresión tumoral *p53*	Mama, hígado y pulmón, entre otros	Mayor riesgo de cánceres diversos; el modelo de la mutación tal vez ayude a revelar el carcinógeno que causó el daño
Marcadores de propensión congénita al cáncer		
Ciertas variaciones (bastante comunes) del gen *citocromo p4501A1* o su actividad	Sangre	(Se está estudiando su idoneidad como marcador de un mayor riesgo de cáncer de pulmón)
Ausencia del gen de la *glutatión-S-transferasa M1* (ausencia muy común; ocurre en casi la mitad de las personas de raza blanca y el 35 por ciento de los afroamericanos)	Sangre	Mayor riesgo de cáncer de pulmón y de vejiga
Variante *H-ras-VTR* del gen *H-ras* (común en los afroamericanos)	Sangre	Mayor riesgo de cáncer de mama y de otros tipos
Mutación en el gen *BRCA1* (mutación rara; ocurre en menos del 1 por ciento de la población)	Sangre	Riesgo altísimo de cáncer de mama y ovario
Marcadores de propensión adquirida al cáncer		
Bajos niveles sanguíneos de antioxidantes o vitaminas	Sangre	(Se evalúa como marcador de un mayor riesgo de cáncer de pulmón, esófago, cuello de útero, mama y otros tipos)
Inmunosupresión	Sangre	Mayor riesgo de diversos cánceres

**Un aducto es el complejo resultante de la combinación de carcinógeno y ADN o proteína.*

complejos aflatoxina B1-ADN o de derivados de la aflatoxina se demostró una probabilidad de enfermar de cáncer hepático tres a cuatro veces superior que la de sus compatriotas que carecían de dichas sustancias en la orina. Si además estaban infectados por el virus de la hepatitis B, otro carcinógeno conocido, su probabilidad se multiplicaba por 60.

Como los aductos, las mutaciones en los genes vinculados con el cáncer pueden constituir biomarcadores de formación tumoral incipiente, pero estos señalizadores reflejan episodios más tardíos en la cadena de sucesos que culmina en el cáncer. Si se descubre la alteración de un gen que está interrumpido en muchos tipos de cánceres, esta información por sí sola dice quizá poco respecto del agente causante. Ahora bien, el conocimiento del tipo preciso de mutación puede ser muy reveladora; éste parece ser el caso del gen *p53*, uno de los mutados con más frecuencia en el cáncer. En su estado sano, el *p53* es un supresor tumoral; bloquea el crecimiento y la división de las células portadoras de genes dañados. Cuando el propio gen *p53* ha sufrido mutación, las células alteradas son libres de transmitir a su progenie los trastornos genéticos potencialmente cancerígenos.

Según las pruebas reunidas por el equipo de Curtis C. Harris, del Instituto Nacional del Cáncer, ciertos modelos de mutación en *p53* reflejan la exposición a sustancias específicas. En fumadores, los tumores pulmonares evidencian una mutación de *p53* que es característica de la exposición a los HPA o a oxidantes y que se produce en muchos sitios del gen. Por contra, en los tumores pulmonares observados entre los mineros del uranio expuestos al radón aparece una sola mutación de “punto caliente” (“hot spot”) en *p53*. En las áreas geográficas donde la aflatoxina B1 y el virus de la hepatitis B producen elevadas tasas de cáncer hepático, las mutaciones de *p53* halladas en los tumores hepáticos tienden a congregarse aún en otro sitio único del gen.

Mutaciones inequívocas de *p53* se observan también en un raro tumor hepático (el angiosarcoma) inducido por exposición laboral al cloruro de vinilo, en el cáncer de colon presumiblemente causado por los carcinógenos presentes en los alimentos y en los tumores cutáneos que aparecen como consecuencia de la exposición a la luz ultravioleta. Como ocurre con los aductos carcinógeno-ADN, los modelos mutacionales no revelan de una manera concluyente la identidad del agente que los causó. Pero combinados con otros datos, tales pautas ayudan a poner de relieve los carcinógenos culpables y enviar una señal de advertencia de que debe reducirse la exposición.

Ni que decir tiene que los rasgos propios de cada individuo inciden también en el desarrollo del cáncer. Tales características contribuyen a explicar por qué una “dosis” dada de carcinógeno induce el desarrollo de cáncer en unas personas, en tanto que otras escapan a la enfermedad. Por consiguiente, además de buscar biomarcadores de exposición y de lesión precoz producida por los agentes carcinógenos, los epidemiólogos moleculares intentan descubrir biomarcadores de sensibilidad innata y adquirida.

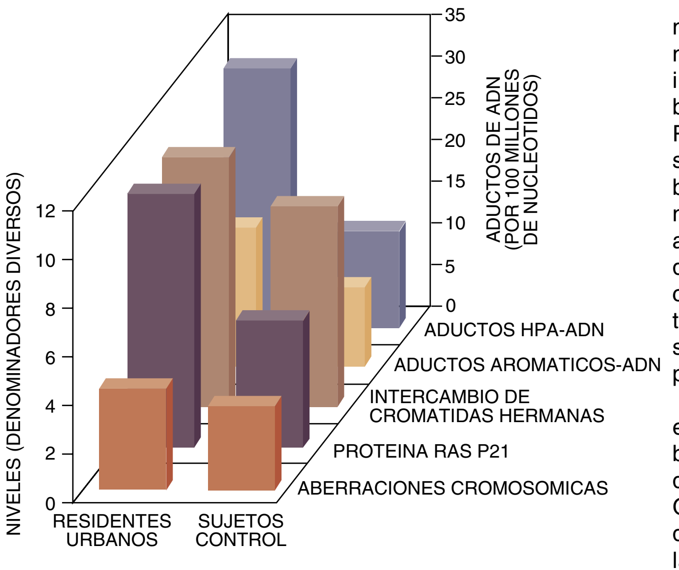
Ciertas mutaciones génicas raras heredadas elevan seriamente el riesgo de una persona de padecer cáncer. Normalmente heredamos dos versiones, o alelos, de cada gen, uno de cada progenitor. Se puede dar, por tanto, la circunstancia de que un niño nazca con un alelo defectuoso de un supresor tumoral conocido (tal es el caso del gen del *retinoblastoma*) y que experimente luego una mutación en el alelo normal. Esta infausta serie de acontecimientos libera, sin apenas ulterior ayuda, las compuertas de la proliferación celular y es la responsable de la aparición del retinoblastoma (cáncer infantil, usurpador de la visión, que da nombre al gen). Y las mujeres nacidas con un gen *cáncer de mama 1* (*BRCA1*, de *breast cancer 1*) mutado se enfrentan a un

Anatomía de un estudio de epidemiología molecular

Se sospecha hace tiempo que los carcinógenos ambientales tienen mucho que ver en los altos índices de cáncer de pulmón que se registran en las zonas industriales. Hipótesis que ha recibido un fuerte espaldarazo con la observación de que ciertos productos de combustión emitidos al ambiente (hidrocarburos policíclicos aromáticos [HPA] y otros) pueden causar cáncer de pulmón en los animales de laboratorio y en las personas expuestas a elevadas concentraciones de esas sustancias en sus lugares de trabajo.

Pero no ha sido fácil demostrar la conexión entre la contaminación del aire y el cáncer en la población general, en parte porque quienes residen en medios contaminados, habitualmente urbanos, tienden a seguir modelos de vida diferentes de quienes viven en las áreas rurales, más limpias. Establecer la importancia relativa de esas diferencias ha resultado en extremo difícil.

En 1990, abordé, con mis colegas de la Universidad de Columbia, Mieczyslaw Chorazy, del Instituto de Oncología de Gliwice, y otros investigadores, un estudio de epidemiología molecular al objeto de acotar la influencia del aire contaminado en el cáncer de pulmón. Demostramos que los contaminantes inhalados del aire extremadamente sucio dejan sus “huellas” en el ADN.



Marcadores en dos poblaciones polacas

Además, cuantas más huellas había mayor era el daño irreversible que acusaban los cromosomas. Puesto que dicha lesión intensifica la probabilidad de cáncer, nuestros hallazgos abonaban la tesis de que una contaminación atmosférica intensa inducía, a buen seguro, el cáncer de pulmón.

En nuestro trabajo examinamos dos poblaciones. Un grupo de sujetos vivía en Gliwice, en la región de Silesia. Una de las zonas más contaminadas del mundo,

tiene un elevado índice de fallecimientos por cáncer. El otro grupo de seguimiento vivía en Biala Podlaska, una provincia rural del nordeste polaco, donde el aire es mucho más limpio y la incidencia de cáncer menor.

Medimos los niveles sanguíneos de los biomarcadores que reflejan exposición a HPA y otros compuestos aromáticos. También medimos los cambios celulares que, de forma más directa, denuncian un mayor riesgo de cáncer. Por marcadores de exposición, que señalaban también la dosis biológicamente efectiva de carcinógeno, empleamos los aductos HPA-ADN y aductos aromáticos relacionados. Otros marcadores fueron las aberraciones cromosómicas, el intercambio de cromátidas hermanas (una alteración cromosómica) y el exceso de síntesis de la proteína ras p21, cifrada por el gen *H-ras.*

Los resultados (*gráfico*) demostraron que, en comparación con los residentes rurales, los que vivían en Gliwice tenían niveles mucho más elevados de HPA-ADN y aductos aromáticos, aberraciones cromosómicas, intercambios de cromátidas hermanas y actividad *ras*. En otras palabras, resultaba palmario que los carcinógenos presentes en el aire sucio podían contribuir al cáncer de pulmón y que la formación de aductos en el ADN eran un anuncio de sus efectos inductores de cáncer. Más tarde, otros estudios han establecido una relación entre niveles elevados de aductos HPA-ADN y riesgo alto de cáncer de pulmón.

—F.P.P.

Calle de la región polaca de Silesia, enormemente contaminada

riesgo muy elevado (por encima del 70 por ciento) de desarrollar cáncer de mama a lo largo de su vida. La herencia del gen dañado puede ser devastadora para la mujer, pero probablemente sólo es responsable de alrededor del 5 por ciento de todos los cánceres de mama.

Pese a todo, los rasgos heredados que más a menudo predisponen a las personas a desarrollar cáncer actúan de una manera más sutil e indirecta, generalmente modulando la reacción del organismo a los carcinógenos. (Es posible, por tanto, que las características sean inocuas si la exposición a los agentes lesivos es limitada.) Tal vez esos rasgos induzcan la conversión rápida de carcinógenos más o menos inactivos en sus formas activas o contribuyan a la relativa ineficacia de los mecanismos de detoxificación de los carcinógenos o de reparación del daño que éstos causan en una persona. Cualquiera de esos atributos podría facilitar el desarrollo de cáncer al incrementar la formación de aductos y las subsiguientes mutaciones genéticas. Las personas diferimos en nuestras respuestas a los carcinógenos porque nuestro acervo génico contiene múltiples formas de ciertos genes que controlan tales respuestas; las formas heredadas por una persona pueden ser más o menos beneficiosas que las recibidas por otra.

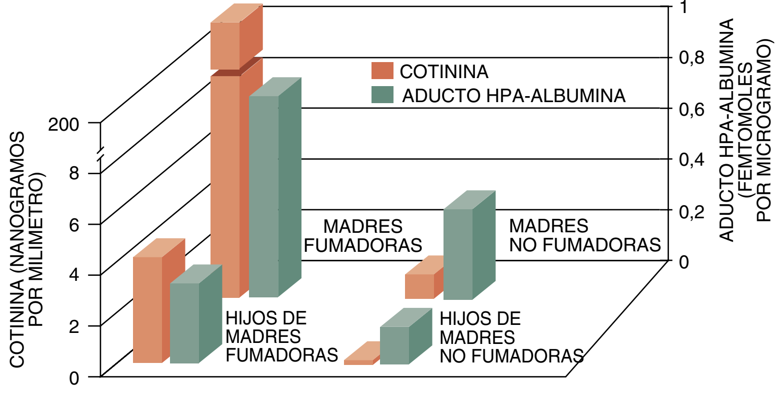
Variaciones en los genes que cifran (o transportan las instrucciones para su fabricación) una familia de enzimas conocida como citocromo p450 se han vinculado con determinada propensión a padecer cáncer. Las moléculas que constituyen el citocromo p450 actúan sobre un amplio espectro de sustancias químicas, foráneas y producidas internamente, volviéndolas inofensivas para el organismo. Por desgracia, en el proceso pueden generar a veces metabolitos intermedios capaces de lesionar el ADN y otros componentes celulares. Son estos intermediarios "activados" los verdaderos carcinógenos; si no se procesaran, muchos de los supuestos carcinógenos serían inofensivos.

Una enzima del citocromo p450 (la CYP1A1) actúa sobre los hidrocarburos policíclicos aromáticos. Según indican los estudios de epidemiología molecular, los fumadores que albergan ciertas formas del gen *CYP1A1* tienen una mayor posibilidad de acabar desarrollando cáncer de pulmón. Cabe suponer que el riesgo es elevado porque las variantes génicas inducen una mayor activación de los HPA por parte de las proteínas CYP1A1. Pequeñas diferencias en los genes que cifran otras enzimas del citocromo p450 parecen influir en el grado en que otros carcinógenos (aflatoxinas, benceno y tetracloruro de carbono) contribuyen al desarrollo tumoral. Por tanto, estas diferencias también podrían servir como marcadores de proclividad a padecer cáncer.

Ciertas clases de enzimas detoxificantes son más constantes en su efecto beneficioso que la familia del citocromo p450. Merecen citarse las glutatión-S-transferasas (GST), una de cuyas variantes, la GSTM1, detoxifica con eficacia los HPA, el óxido de etileno y el estireno (productos todos encontrados en el humo del tabaco, en determinadas tareas y en el aire de las ciudades). Aproximadamente la mitad de las personas de raza blanca carece del gen *GSTM1*. Se ha establecido una firme asociación entre esta deficiencia y una mayor tendencia al desarrollo de cáncer vesical y pulmonar, de modo que la ausencia del gen podría considerarse un razonable biomarcador de predisposición innata.

Otra enzima, la NAT2 (*N*-acetiltransferasa), desactiva las aminas aromáticas carcinógenas (presentes en la contaminación del aire, el humo del tabaco y los alimentos cocinados de cierta manera). Varios hallazgos sugieren que una forma de acción lenta de la NAT2 contribuye al desarrollo del cáncer de vejiga. En comparación con las personas sanas, la probabilidad de los pacientes con este tipo de cáncer de ser portadores del gen que determina la síntesis de la enzima lenta es mayor. Por otro lado, Paolo Vineis, de la Universidad de Turín, y Steven R. Tan-





3. FUMADORES PASIVOS. El humo respirado en el hogar puede elevar las probabilidades de que los niños adquieran cáncer de pulmón en una etapa posterior de su vida. Un estudio llevado a cabo por la autora y su equipo avala esa tesis. Los niveles sanguíneos de cotinina (un derivado de la nicotina y un marcador de la inhalación de humo) y de un aducto denominado HPA-albúmina (un marcador indirecto de la lesión del ADN) eran más elevados, no sólo en las madres que fumaban en comparación con las no fumadoras, sino también en los hijos de fumadores respecto a los de no fumadores (*gráfico*). Dado que la mayoría de las madres fumaban menos de un paquete al día, las estadísticas sugieren que incluso el consumo moderado de cigarrillos por los progenitores puede perjudicar a los niños.

nenbaum, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han demostrado la presencia de altos niveles de proteína ligada a aminas aromáticas en la sangre de individuos que poseen la enzima NAT2 lenta.

Más allá de los indicadores genéticos de vulnerabilidad, los científicos buscan marcadores de vulnerabilidad a los agentes carcinógenos adquirida. La probabilidad de desarrollo tumoral aumenta con el deterioro del sistema inmunitario y a consecuencia de trastornos del tipo de los desequilibrios hormonales, la hepatitis y la enfermedad pulmonar crónica. Pruebas concluyentes indican también que una dieta pobre en fruta y verduras, que contienen antioxidantes y otros nutrientes (como las vitaminas A, C y E), aumenta la probabilidad de adquirir cánceres diversos, entre ellos los de pulmón, esófago, boca, laringe, de cuello de útero y mama. Mediante una serie de mecanismos, los antioxidantes pueden bloquear la lesión del ADN producida por los radicales de oxígeno, los HPA y otros productos químicos.

La epidemiología molecular augura un gran refinamiento de las estimaciones de riesgo de desarrollar cáncer al tener en cuenta las variaciones intrapoblacionales en la sensibilidad innata y adquirida. Destacaría, sin embargo, que en la mayoría de los casos los cálculos de riesgo basados sólo en características genéticas resultarán incompletos e incluso engañosos. En la modulación del efecto de cualquier gen de actuación sutil pueden intervenir las influencias ambientales, otros genes, el estado nutricional o sanitario y múltiples peculiaridades más del huésped. Por si fuera poco complejo, ciertos rasgos genéticos podrían proteger contra un tipo de cáncer y predisponer a otro. (La NAT2, por ejemplo, detoxifica los carcinógenos vesicales y activa los del colon.) Pero, en último término, la valoración de rasgos múltiples, combinada con las evaluaciones biológicas de exposición y lesión temprana, debería proporcionar unas estimaciones significativas del riesgo.

Puede que los epidemiólogos moleculares no estén todavía listos para evaluar con precisión las posibilidades que tiene un individuo dado de padecer un cáncer, pero su investigación ya ha empezado a aclarar algo de la variación del riesgo de cáncer observada entre razas y edades. Por ejemplo, la epidemiología clásica ha demostrado que la incidencia de cáncer y los índices de defunción suelen ser más elevados entre los norteamericanos de raza negra que entre los de raza blanca. En Estados Unidos la incidencia de cáncer de células escamosas (una tumoración del esófago) entre los varones de raza negra triplica de lejos la observada entre los de raza blanca; la incidencia del cáncer de pulmón es alrededor del 50 por ciento superior en los varones de raza negra. Las mujeres de esta raza menores de 40 años experimentan más cáncer de mama que las de raza blanca de la misma edad, aunque la situación se invierte entre las mayores de 40 años.

Una revisión de muchos estudios proporciona pruebas convincentes de que al menos algo del exceso de riesgo observado entre las personas de raza negra y otras minorías nace de una mayor exposición a los carcinógenos. Los estadounidenses de color y rentas bajas están desproporcionadamente expuestos a ciertas sustancias ambientales tóxicas (el plomo entre ellas), la contaminación atmosférica y residuos peligrosos. Además, las personas que viven en la pobreza a menudo toman alimentos con bajo contenido en vitaminas y otros nutrientes protectores.

Desde la perspectiva de la epidemiología molecular, en esos grupos, los efectos de la exposición ambiental y una nutrición inadecuada pueden verse exacerbados por diferencias congénitas en el procesamiento interno de los carcinógenos. Por ejemplo, en un estudio se ha vinculado una variante del gen *CYP1A1* activador de carcinógenos, encontrado sólo en afroamericanos, con un mayor riesgo de adenocarcinoma (una forma de cáncer de pulmón): la probabilidad de que los varones fumadores de raza negra portadores de esta variante desarrollaran cáncer de pulmón duplicaba o triplicaba la de otros fumadores de la misma raza que carecían de la variante. También parece que la lesión del ADN causada por los HPA es mayor en los afroamericanos que en los mexicoamericanos. La variante que afecta al gen *H-ras* se encuentra con más frecuencia entre personas de raza negra que entre las de raza blanca; esta variante va asociada a un mayor riesgo de padecer leucemia, así como cánceres de pulmón, mama, colon y vejiga, a través de mecanismos todavía no conocidos.

Ningún grupo racial o étnico en su totalidad parece ser sistemáticamente más sensible al cáncer que otro

grupo. Pero sí parece que cada población exhibe una frecuencia bastante elevada de ciertos rasgos genéticos que, según se cree, incrementan su propensión a un proceso canceroso o a otro.

Se sabe desde hace tiempo que, al igual que ocurre con la etnia, la edad de una persona en el período de su exposición a un agente carcinógeno influye en la probabilidad de aparición del cáncer. Los fetos, los lactantes y los niños corren mayor riesgo que los adultos ante una serie de carcinógenos ambientales. Los estudios de contaminación atmosférica, humo del tabaco, HPA, plaguicidas, nitrosaminas, aflatoxina B1 y radiación demuestran también que el riesgo de desarrollar cáncer a lo largo de la vida crece si la exposición se inicia en el útero o en la infancia. Un tiempo de incubación más largo e índices de proliferación celular mayores durante las primeras fases del desarrollo desempeñan, según parece, un papel en este desenlace (las células en fase proliferativa son más propensas a daños genéticos que las células en reposo). Los niños detoxifican ciertos carcinógenos y reparan las lesiones moleculares también con menos eficacia que los adultos. Además, es frecuente que los niños absorban mayores cantidades de ciertos carcinógenos, en relación a su peso corporal, que los adultos.

Los lactantes ingieren de 10 a 20 veces más dioxinas para su peso corporal que los adultos en el transcurso de un día. Mis colegas y yo misma hemos observado que los niveles de aductos HPA-ADN en la sangre de los neonatos de un área contaminada de la Europa oriental superaban los de sus madres, aun cuando se considera que un feto está expuesto sólo a una décima parte de la dosis de HPA absorbida por su madre. Hemos demostrado también que hijos pequeños de madres fumadoras bastante moderadas (con una media de 10 cigarrillos al día) tenían cantidades notablemente superiores de aductos HPA-proteínas en su sangre que los hijos de madres no fumadoras.

Dos temas generales que surgen de la investigación epidemiológica molecular sobre el cáncer tienen fuertes implicaciones en la política de salud pública. En primer lugar, la investigación viene a confirmar una cantidad ya impresionante de pruebas en el sentido de que la mayoría de los cánceres tiene un componente ambiental y, por tanto, puede evitarse a través de un doble enfoque: modificación de las conductas peligrosas y, en el ámbito gubernamental, reducción de la exposición involuntaria a sustancias carcinógenas del aire, el agua, los alimentos y los lugares de trabajo. De hecho, se ha calculado que, en ausencia de exposiciones ambientales, la incidencia del cáncer se reduciría hasta en un 90 por ciento.

En segundo lugar, los datos recogidos refuerzan otra prueba convincente de que los agentes carcinógenos ambientales son más peligrosos para unos miembros de la sociedad que para otros, pese a que la exposición sea la misma. De lo que se infiere que sólo se derivarán beneficios significativos en la prevención del cáncer si se asegura la protección (mediante leyes, educación y otras medidas) de esas personas más vulnerables.

Los gobiernos no prestan todavía la atención adecuada a la diferente sensibilildad de las personas a los carcinógenos. Los entes públicos se sirven de un criterio, la valoración de riesgo, para determinar los niveles de exposición a carcinógenos que causarían un número "inaceptable" de cánceres en el futuro. Este objetivo es razonable, pero la mayor parte de los enfoques actuales se basa en la suposición equivocada de que todos los individuos de una población tienen una respuesta idéntica ante el agente oncogénico. Lo que explica que los resultados pueden infravalorar seriamente el riesgo de ciertos grupos. El equipo de Dale B. Hattis, de la Universidad Clark, ha calculado que bastan unos pocos factores de propensión para incrementar el riesgo de cáncer de un grupo en un orden o más de magnitud por encima del pronosticado para la supuesta población "estándar".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOLECULAR EPIDEMIOLOGY. Dirigido por P. A. Schulte y F. P. Perera. Academic Press, 1993.

P53: AT THE CROSSROADS OF MOLECULAR CARCINOGENESIS AND RISK ASSESSMENT. C. C. Harris en *Science*, vol. 262, páginas 1980-1981; 24 de diciembre, 1993.

MOLECULAR BIOMARKERS FOR AFLATOXINS AND THEIR APPLICATION TO HUMAN CANCER PREVENTION. J. D. Groopman y cols. En *Cancer Research*, vol. 54, n.º 75, páginas 1907S-1911S; 1 de abril, 1994.

Perfiles

Luis Alonso

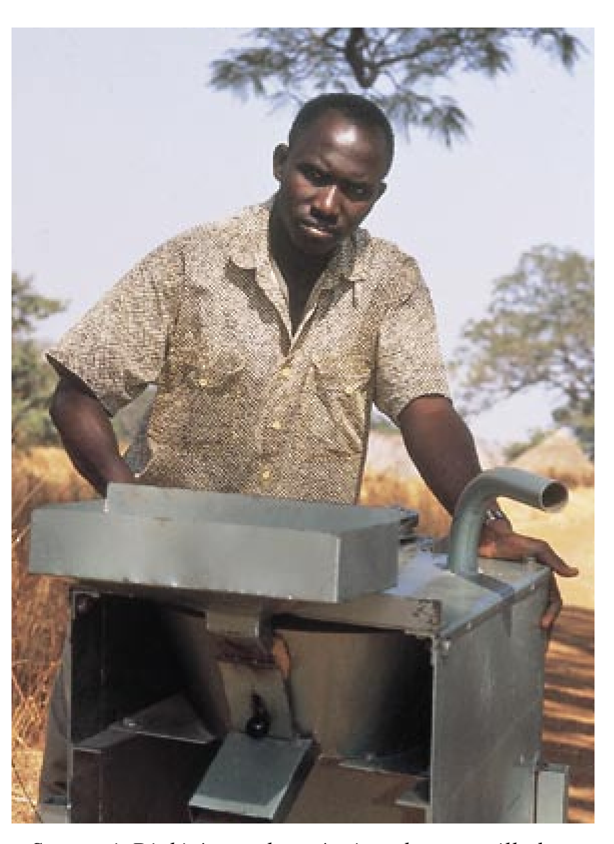
SANOUSSI DIAKITÉ: *La voluntad en la técnica*

Ginebra, 15 de mayo. En uno de los grandes salones del hotel Intercontinental se procede a la entrega de los premios Rolex a la Iniciativa 1996. Sube al estrado Luc Montagnier, descubridor del virus del sida, quien justifica las razones de su voto a Sanoussi Diakité, un senegalés ni alto ni bajo, rotundo, que sonríe con la alegría de una estampa comboniana, en la que sus dientes brillan blancos sobre campo de gingivas rojísimas. El microbiólogo parisiense pondera la importancia dietética del fonio (*Digitaria exilis*), una gramínea cultivada en 15 países africanos, desde Cabo Verde hasta Chad, pasando por Costa de Marfil, Camerún y Togo. El fonio es ligero y de fácil digestión. Presenta un alto contenido en aminoácidos y es rico en hierro. Se recomienda a los diabéticos, mujeres gestantes y niños. Entra en la composición de medicamentos contra el meteorismo intestinal.

Diatiké conoce bien el cereal, perfectamente adaptado a la aridez subsahariana y a las lluvias torrenciales. "De niño, en casa, se comía dos o tres veces por semana", comenta en un francés de la metrópoli. Ese es el primer rasgo de su personalidad atractiva. Su expresión morosa y nítida, amasada con destellos de intuición y lógica roqueña, refleja una formación singular. "No tanto", responde con presteza. "Es bastante habitual en mi país."

Le ruego que me hable de su trayectoria personal. Del estado de la ciencia y de la técnica en el Tercer Mundo, en particular en el Senegal. Le adelanto la ignorancia enciclopédica de la mayoría de los europeos sobre lo que ocurre más abajo del Magreb, fuera del rally París-Dakar o las confusas guerras tribales que recogen los telediarios con imágenes patéticas. Ante su extrañeza, con un punto de recelo, me siento obligado a matizar que esa impresión no es en absoluto general. En Francia sobre todo, pero también en España, la doctrina de la negritud enarbolada por Léopold Sedar Senghor despertó un vivo interés en los años sesenta, que se tradujo en un auténtico aluvión de libros y artículos. Parece ahora más confiado.

"Nací en el seno de una familia numerosa de campesinos, o lo que es lo mismo, de unos padres humildes del mediodía del Senegal." Pudo entrar en el liceo y cursar luego la carrera de ingeniero diplomado de la ENSETP, la Escuela Nacional Superior de Estudios Técnicos y Profesionales de Dakar. Posteriormente, se especializó para seguir la carrera docente. De sus hermanos, los mayores no pudieron asistir a la escuela, necesitado el campo de braceros. Pero tiene uno que es profesor también, otro que es economista y un tercero que es etnolingüista. A él le interesa, además de la ciencia y la técnica, la historia. "Conocer la historia es entender tu entorno."



Sanoussi Diakité con la máquina descascarilladora que le ha valido el premio Rolex 1996

No suena a huera retórica su interés por el entorno, que para él entraña un significado más humano que bucólico al uso. Sueña, y dice que es la utopía de su generación, levantar Africa sin enterrar ni un instante de su pasado, sin perder ni una sola de sus costumbres. Así se entiende mejor su empeño en el fonio. Esta planta no sólo constituye parte sustancial de la dieta, sino también de la etnofarmacia. Crece con tal rapidez, que los agricultores pueden obtener hasta tres cosechas al año. U obtenían. Los campos se han ido abandonando, y hoy un kilo de fonio cuesta en la plaza de Dakar tres o cuatro veces lo que vale un kilo de arroz. "Lo que antaño fue comida común hoy se ha convertido en un plato carísimo y marginal en la economía africana."

Pero el jurado de Rolex no se ha fijado en él por su familiaridad con la botánica. Sanoussi Diakité, que enseña técnicas mecánicas en el instituto de formación profesional M. Delafosse en Dakar, ha inventado una máquina descascarilladora de las semillas de fonio que promete recuperar los campos de ese cultivo básico para millones de africanos.

¿Por qué se fue perdiendo? "Por la dureza de su preparación. Piense que, en un kilo, entran hasta dos millones de granos, redondos y quebradizos." La simiente, del grosor de una cabeza de alfiler pequeño, se protege con dos cascarillas finísimas. Con el método tradicional se tarda más de una hora en descascarillar un par de kilos. Ningún otro cereal requiere tanto esfuerzo y dispendio energético.

Tarea reservada a las mujeres, todavía hoy se realiza con un palo largo a modo de mano de mortero. Hay que majar y cerner la mezcla de grano y arena, tres o cuatro veces. Luego debe separarse, en un proceso tedioso, la arena de las semillas limpias. Se necesitan 15 litros de agua para eliminar la arena. Mientras que existen métodos mecánicos para descascarillar otros cereales, no había ninguno para el fonio debido al tamaño mínimo y fragilidad del grano.

¿Cómo diseñarlo? Tenía ahí un reto. Por necesidad en su medio, y en Diatiké también por vocación, está acostumbrado a crear las máquinas herramientas que debe emplear en sus clases de mecanización. "En mi país, para cualquier cosa, partimos siempre de la nada. Los talleres de las escuelas carecen de los elementos que ustedes considerarían imprescindibles para explicar una lección. Si preciso un útil, debo fabricarlo." Muchas veces a costa de su propio bolsillo.

Entre clase y clase fue pergeñando la máquina descascarilladora. Por fin, en 1993 acabó el primer prototipo, una máquina que pesaba 50 kilos. En ella el grano pasaba de una tolva a la cámara de descascarillado, donde las semillas sufrían una suave raspadura en su tránsito por un dispositivo giratorio. Las cascarillas se eliminaban luego de la parte superior o lateral de la máquina y, una vez terminado el proceso, los granos limpios se recuperaban.

Esos primeros ensayos resultaron estimuladores: se había logrado un descascarillado del 95 por ciento, manteniendo enteros los granos. La máquina tardaba seis minutos en limpiar dos kilos de fonio. "Aunque la razón de velocidad a peso depende en buena parte del tamaño de la cámara descascarilladora." Además de ahorrar energía, la descascarilladora es de una sencillez extraordinaria. Si a ello añadimos su fácil manejo tras un breve adiestramiento, nos daremos cuenta en seguida de la eficacia potencial que encierra su aplicación en zonas rurales. Requiere un mantenimiento mínimo: cambiar periódicamente los componentes abrasivos gastados.

Los dos primeros prototipos fueron muy bien recibidos por los campesinos y los peritos agrícolas. Pero no todo fueron parabienes. "Si alguien en mi país despunta en algo, no te faltarán los aguafiestas de siempre, que dirán 'seguro que lo ha copiado de alguna revista extranjera. A mí eso me suena'." Diatiké siguió adelante y en 1994 obtuvo la patente, con el respaldo que ello supuso. La próxima etapa será la fabricación industrial. En 1997, terminadas todas las fases de prueba y con el espaldarazo internacional que le ha ofrecido la empresa Rolex con su premio a la Iniciativa 1996 proyecta instalar una factoría que produzca sus prototipos. "La estableceré en Casamance, mi pueblo. Aprovecharé así los créditos que concede el gobierno para quien instale una industria fuera de los límites de Dakar."



Método tradicional de preparar el fonio

El impacto potencial de la descararilladora de Diatiké ha sido reconocido por la FAO, que ha encargado un informe al Centro de Cooperación Internacional para Investigación en Agricultura y Desarrollo con sede en Montpellier. Nicolas Bricaz, director de programas de dicha institución, confiesa el carácter innovador de la limpiadora de Diatiké: "Nosotros habíamos desarrollado una máquina similar en el Centro de Cooperación el año pasado, pero nuestros resultados no alcanzan ni de lejos su rendimiento. Diatiké no se ha propuesto adaptar un descascarillador de mijo o arroz, el camino que nosotros seguimos, sino que ha ingeniado una solución radicalmente novedosa." Todos destacan la tenacidad y fuerza de Diatiké, en particular su capacidad para vencer las dificultades en un país —y un continente— donde la iniciativa suele quedar ahogada y las posibles invenciones ni siquiera llegan a la fase de prototipo.

Su ejemplo puede cundir. Habla con orgullo de la Universidad de Dakar, en cuyo claustro profesores nativos alternan las cátedras con profesores franceses y belgas. "La Universidad de Dakar no tiene nada que envidiar a las universidades europeas. La diferencia se da en el terreno de los medios. Existe en ella un plantel importante de investigadores que obtienen resultados. El problema estriba en la aplicación."

Una y otra vez vuelve al obstáculo principal contra el desarrollo: la falta de medios. "La habilidad técnica no constituye ninguna rareza en el Senegal. Nuestros artesanos, mis alumnos, ejecutan tan bien su oficio como los de cualquier parte del mundo. Más aún. Diría que nuestros ingenieros y técnicos alcanzan un nivel de pericia por encima de la media. Pero les falta utillaje. Esa carencia debe compensarse con convicción y voluntad. La convicción y la voluntad me han ayudado a vencer los obstáculos que he ido encontrando en la realización de la máquina descascarilladora del fonio."

Senegal, como muchas naciones africanas, es un país de contrastes. Los productos occidentales han penetrado en el Tercer Mundo. "En mi país, por ejemplo, han servido para resolver numerosos problemas reales; en otros casos, sin embargo, han creado necesidades inútiles. La producción nacional de bienes industriales sigue siendo todavía marginal. Padecemos, además, una suerte de complejo en nuestras relaciones con la técnica en general. Me costó mucho tiempo convencer a la gente de que la máquina descascarilladora del fonio era una auténtica invención. El futuro de la ciencia y la técnica dependerá de nuestra voluntad de incorporarla y tomar las riendas."

Su vocación e ilusión ante cualquier ingenio mecánico no acorta su horizonte. Diríase que vive en el espíritu de la negritud. Se explaya en su forma de entender la incardinación del progreso científico en las peculiaridades regionales que nada tienen que ver con los nacionalismos a ultranza que asuelan, soterrada o manifiestamente, a Europa. "He escogido deliberadamente estar al servicio de una comunidad y participar en la satisfacción de sus necesidades."

Ciencia y sociedad

Química física

Espectros de fluorescencia inducida

Gran parte de nuestro conocimiento sobre la estructura y comportamiento de los átomos y moléculas se basa en investigaciones espectroscópicas. Un espectro es el resultado de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Dependiendo de la configuración electrónica, esto es, de la distribución de los electrones en torno al núcleo o núcleos, un átomo o molécula puede presentar distintos estados energéticos, o estados electrónicos. Llamamos fundamental al estado electrónico de más baja energía; estado excitado, a cualquier otro.

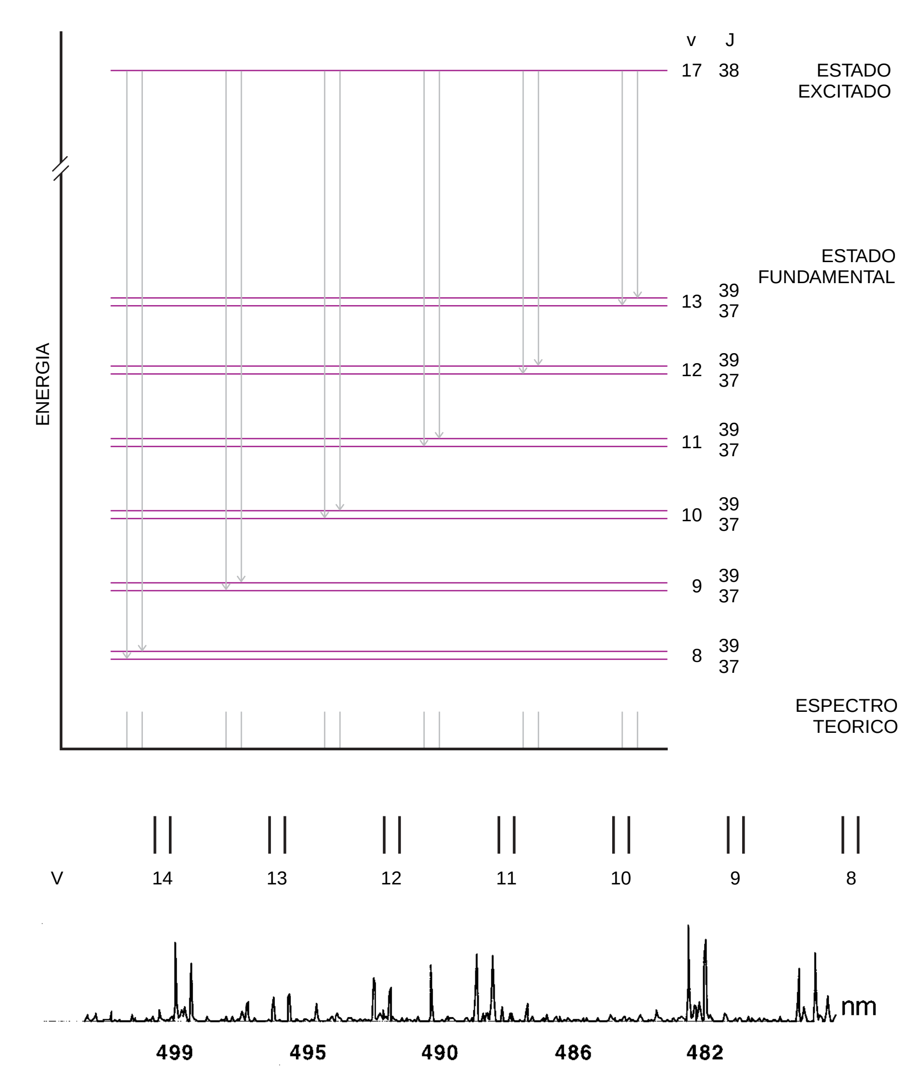
Cuando una radiación electromagnética incide sobre la materia, ésta puede absorberla, pasando los átomos o moléculas de su estado fundamental a un estado excitado. Si la radiación incidente es un continuo de longitudes de onda, sólo se absorben algunas; la representación de la intensidad de la radiación en función de la longitud de onda forma el espectro de absorción. A la emisión de la radiación electromagnética absorbida previamente se la denomina fluorescencia, y se entiende por espectro de fluorescencia la representación de su intensidad en función de la longitud de onda.

La intensidades de absorción y fluorescencia dependen de varios factores. Uno de ellos es el número de átomos o moléculas en el estado electrónico de partida. En el caso de la absorción, este estado electrónico es el fundamental, y el número depende directamente de la concentración. Una alta intensidad de absorción requiere una alta concentración. En el caso de la fluorescencia, el estado de partida es un estado excitado, al cual se accede por absorción previa. Esto implica que el número de moléculas en dicho estado será función de la concentración y de la intensidad de la radiación excitadora. Consiguientemente, para detectar un espectro de fluorescencia se requiere una alta intensidad de excitación; pero no se precisan grandes concentraciones. De ello se infiere que el espectro de fluorescencia puede detectarse a concentraciones mucho más bajas que las necesarias para observar un espectro de absorción ordinario.

Cuando se estudia un gas atómico, ambos espectros, el de absorción y el de fluorescencia, son bastante sencillos. No ocurre lo mismo con los sistemas moleculares gaseosos. Se hallen éstos en el estado electrónico fundamental o en los excitados, contienen un sinfín de subestados cuantizados, debido a las distintas formas de vibrar y de rotar que pueden tener los átomos en dichas moléculas. Por tanto, los espectros se complican y presentan un gran número de líneas, que se agrupan y forman bandas. En efecto, a medida que aumenta la complejidad molecular, o se está en fase condensada, la estructura de líneas separadas se va perdiendo y sólo se observan bandas.

Cuando se mantiene la estructura de líneas en los espectros, podemos simplificarlos utilizando radiación monocromática como fuente de excitación. En estas condiciones, y para el caso de átomos, sólo se alcanza un estado excitado y, por consiguiente, sólo se observa una línea de fluorescencia. Hablamos entonces de espectros de fluorescencia atómica; en consonancia, la técnica será espectroscopía de fluorescencia atómica.

En el caso de moléculas, sólo podrán alcanzarse, desde el estado



Porción del espectro de fluorescencia inducido por láser iónico de argón (λ = 465 nm.) en Na_2. Parte superior, diagrama de las transiciones; parte inferior, espectro experimental

fundamental, unos pocos subestados del estado electrónico excitado. La condición para que dos subestados entren en contacto es que su diferencia en energía sea igual a la energía de la radiación monocromática incidente. No es la única exigencia. Hay otras condiciones impuestas por la mecánica cuántica, las llamadas reglas de selección. Nos hallamos entonces ante la situación siguiente: *a*) debido a la monocromaticidad de la radiación y a las reglas de selección, sólo son alcanzables algunos subniveles del estado electrónico excitado; *b*) en el proceso de fluorescencia, y también como consecuencia de las reglas de selección, sólo se observarán algunas transiciones a subniveles del estado fundamental. Y así el número de líneas del espectro se reduce drásticamente. A los nuevos espectros, obtenidos con radiación monocromática, se les denomina espectros de fluorescencia inducida.

Los primeros trabajos en los que se detecta fluorescencia a partir de una excitación de cierta monocromaticidad se deben a Viedman y Schmidt en el año 1896. Como fuente de excitación emplearon radiación solar, que se recogía sobre una cubeta donde había vapor de sodio; el espectro se observaba con un pequeño espectroscopio. Se halló que, además de las líneas atómicas de sodio, aparecía una emisión amarillo-verdosa de gran intensidad. El espectro de dicha emisión fluorescente fue registrado por Wood y Moore en 1903, quienes trabajaron con lámparas de mercurio y cadmio como fuente de excitación. La radiación emergente se hacía pasar primero por un monocromador. Gracias a ese dispositivo, se obtuvieron unos espectros de fluorescencia muy simples, formando unas progresiones características, las series resonantes de Wood.

Aunque el fenómeno se conoció y estudió antes del desarrollo de la mecánica cuántica, no fue hasta 1940 cuando, con la aplicación del modelo cuántico para una molécula diatómica, el propio Wood dio una interpretación satisfactoria del mismo. Si una radiación monocromática es capaz de excitar una molécula diatómica de sodio, desde el estado fundamental $X^1\Sigma_g$ al segundo excitado $B^1\Pi_u$, los niveles rotacionales implicados en la transición deben cumplir cierta condición: que el incremento en el número cuántico rotacional J no puede ser más que –1,0 y +1. No hay, sin embargo, limitación alguna para el incremento en el número cuántico vibracional v. Esto, junto con algún condicionamiento adicional debido a la simetría molecular, hace que cuando la excitación se produce con $\Delta J = 0$, la fluorescencia consista en una sola línea, también con $\Delta J = 0$, por cada banda vibracional. Si la excitación es con $\Delta J = +1$, o $\Delta J = -1$, la fluorescencia consiste en dos líneas por cada banda vibracional. Esto explicaba todas las líneas en el espectro de fluorescencia resonante de Wood.

En los años sesenta aparecen los láseres. Se dispone así de una nueva fuente de radiación de muy alta intensidad y monocromaticidad, ideal para la excitación en los experimentos de fluorescencia inducida. Hoy no se habla ya de fluorescencia inducida a secas, sino de fluorescencia inducida por láser (o LIF). El primer estudio de fluorescencia inducida por láser lo realiza, en 1968, Richard N. Zare sobre la molécula diatómica de potasio, utilizando un láser de helio-neon. Con posterioridad y con el desarrollo de nuevos láseres el estudio se ha ido extendiendo hacia sistemas progresivamente más complejos, abriéndose un campo ilimitado en el conocimiento de la estructura molecular.

Para concluir diremos que la técnica LIF se puede aplicar desde la asignación de espectros moleculares (determinación de constantes moleculares, curvas de energía potencial, probabilidades de transición, etcétera) hasta el estudio de procesos colisionales o determinación de productos de reacciones químicas. Uno de los aspectos más llamativos de la técnica LIF se refiere a la detección de pequeñas concentraciones de componentes moleculares, debido a la alta intensidad de los láseres. En la actualidad, por ejemplo, se está utilizando en la detección de contaminantes, así como en el diagnóstico de tumores en medicina.

J. Manuel L. Poyato, Joaquín J. Camacho y Antonio Pardo
Universidad Autónoma de Madrid

Urolitiasis

Test diagnóstico

La formación de cálculos renales obedece en casi todos los casos, si no en todos, a la desafortunada y necesaria combinación de varios factores, que pueden clasificarse en dos grandes grupos: inherentes a la composición de la orina y relacionados con la anatomía morfológica del riñón.

La orina es un medio en el que normalmente existen diversas sustancias que pueden cristalizar formando cálculos. El que tales sustancias cristalicen o no dependerá de su concentración, de la presencia de elementos promotores (nucleantes heterogéneos) y de la presencia de inhibidores de la cristalización.

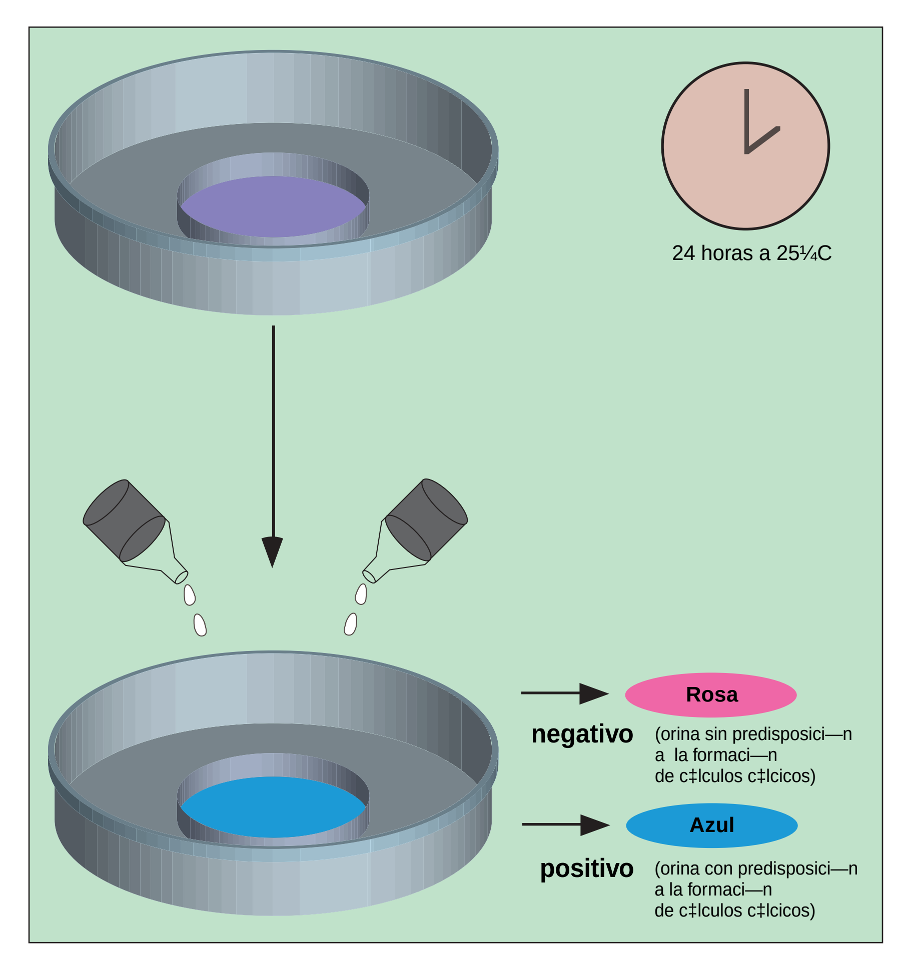
La existencia de cavidades con baja eficacia urodinámica y las alteraciones del epitelio que recubre la papila renal son factores ligados a la estructura renal que favorecen la formación de cálculos renales.

Así las cosas, los autores nos planteamos el desarrollo de un ensayo para evaluar la capacidad de cristalizar sales cálcicas que posee la orina de un sujeto cualquiera. La investigación dio por resultado la patente de un test en forma de protocolo, o “kit” (patente P9401455), que se comercializará próximamente y que permitirá evaluar, de forma muy simple, el riesgo de que una orina tienda a formar cálculos renales.

El test está basado en el hecho de que, cuando una superficie carente de protección se pone en contacto con la orina, acaban cristalizando sobre ella las sustancias sobresaturadas. La facilidad con que se produce dicha cristalización depende de lo favorable que sea la combinación de factores que la impulsan (sobresaturación, déficit de inhibidores de la cristalización y presencia de promotores de la cristalización).

Utilizando una superficie adecuada podemos calcular un intervalo temporal en el que no cristalizará la orina normal, pero sí se desarrollarán sales cálcicas en la orina litógena. La detección del calcio generado en estas condiciones, empleando una reacción colorimétrica, constituye el medio de interpretación del test propuesto. El resultado del test es positivo si aparece el color azul, consecuencia de la reacción del colorante con el calcio. Si no se ha producido cristalización de sales cálcicas (orina no litógena), aparecerá el color rosado del colorante y el resultado del test será negativo.

Los resultados obtenidos con la aplicación del test muestran una excelente discriminación entre el grupo de individuos sanos y el grupo de pacientes con actividad litiásica significativa y orinas alteradas, lo que demuestra la utilidad del test para sacar a la luz alteraciones urinarias que puedan conducir a la formación de cálculos renales. Si se desea detectar de forma específica alguna alteración concreta, habrá que efectuar



Representación esquemática del test diseñado con el fin de detectar la predisposición de una orina a la formación de cálculos cálcicos

un estudio analítico más detallado de la muestra.

Aunque poco frecuente, puede darse el caso de que una orina litógena pertenezca a un individuo que nunca ha formado cálculos renales; la razón se esconde en los factores morfoanatómicos del riñón, que están orientados a evitar el desarrollo de concreciones sólidas, por ejemplo, como consecuencia de la existencia de una capa de glicosaminoglicanos (capa antiadherente) bien desarrollada. Puede darse también el caso contrario, en el que, en un momento determinado, una orina, normal desde un punto de vista litógeno, pertenezca a un individuo litiásico, lo que debe atribuirse a una situación en la que los factores morfoanatómicos renales están alterados, como en el caso de la presencia de una importante necrosis papilar, que favorecería la formación de cálculos renales.

La actividad litógena de un individuo no es la misma todos los días del año. Existen épocas, como el verano, propicias para el desarrollo de cálculos renales. También hay que considerar la influencia de ciclos, como el menstrual que afecta a la eliminación de citrato. Para un individuo litiásico pueden darse, pues, temporadas cuya orina no presenta actividad litiásica y otras con actividad. La aplicación del test permitirá detectar indudablemente dichos períodos.

En conclusión, el test propuesto permite efectuar una evaluación global del riesgo urinario para formar cálculos cálcicos. Si el resultado es positivo, indicará una predisposición de la orina a la formación de cálculos cálcicos; si se desea conocer con más exactitud el factor o factores urinarios alterados (hipercalciuria, hipocitraturia), será necesario un estudio analítico de la orina más completo. Si el resultado del test es negativo y se generan cálculos cálcicos en ausencia de infección urinaria, significará que la alteración que los produce radica en los factores morfoanatómicos renales.

Por tanto, la aplicación del test presentará un especial interés en cuatro frentes: discriminación rápida de pacientes con litiasis cálcica; identificación de predisposición a la formación de cálculos renales cálcicos en individuos con un importante factor de riesgo litógeno (por ejemplo, en casos de existencia de antecedentes familiares directos); evaluación de la eficacia de una determinada terapia correctora del riesgo litógeno urinario, detección de períodos con actividad litógena acentuada, y para el control urinario de las terapias preventivas de la osteoporosis.

F. Grases, A. Costa-Bauzá,
L. García-Ferragut, A. Conte
Universidad de las Islas Baleares
y Hospital Son Dureta

Radiactividad ambiental

Radón en viviendas españolas

La sociedad dedica una gran cantidad de recursos, humanos y materiales, a medir la exposición y evaluación de riesgos procedentes de las fuentes de radiactividad artificial (centrales nucleares, por ejemplo) y la consiguiente reducción de sus riesgos. Menos atención le merece la reducción de la exposición a las fuentes naturales. Lo que no deja de resultar paradójico, pues en promedio el 90 por ciento de la exposición a las radiaciones es de origen natural. De este porcentaje, aproximadamente la mitad puede atribuirse al radón.

El radón se produce por la desintegración radiactiva del radio, elemento que, en cantidades variables, está presente en suelos y rocas. Por ser un gas, el radón se mueve mediante procesos de difusión y convección a través del suelo. Ello significa que se libera sin cesar desde le superficie de la tierra.

La concentración de radón se expresa en becquerels por metro cúbico. Un becquerel equivale a una desintegración radiactiva por segundo. (Esta unidad del sistema internacional honra la memoria de Henri Becquerel, físico francés que descubrió el fenómeno de la radiactividad en 1896.) Al aire libre, sobre suelos, la media mundial de la concentración de radón es de 10 becquerels por metro cúbico. Sin embargo, cuando el gas radón entra en un edificio u otro espacio cerrado, se produce una acumulación del mismo y de sus descendientes radiactivos hasta niveles cuatro veces superiores a los existentes en el exterior.

Los países avanzados han reconocido la importancia del radón entre los elementos agresivos del medio. Y así se han esforzado en definir la distribución de niveles en una escala nacional y, en particular, en identificar las áreas geográficas con más alta exposición. España no ha sido una excepción. En los últimos años se han emprendido diversas campañas de vigilancia de magnitud variable. Estas campañas han obedecido a iniciativas del Consejo de Seguridad Nuclear, de equipos universitarios y del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). En su conjunto, ofrecen una información representativa de la realidad española.

Pese a todo, la única vigilancia que ha cubierto la totalidad del territorio nacional la empezó en 1988 un equipo encabezado por L. S. Quindos, de la Universidad de Cantabria. Se dividió a España en áreas de muestreo. En cada una se seleccionó la localidad más representativa de la geología local, procurando que los puntos escogidos distaran de 100 a 125 kilómetros entre sí. Todas las medidas se realizaron en viviendas. En total se llevaron a cabo medidas de radón en 55 localidades, lo que aseguraba una cobertura geográfica homogénea de la nación. En cada localidad se midieron 30 casas, siempre de tipo unifamiliar y nunca de bloques de apartamentos.

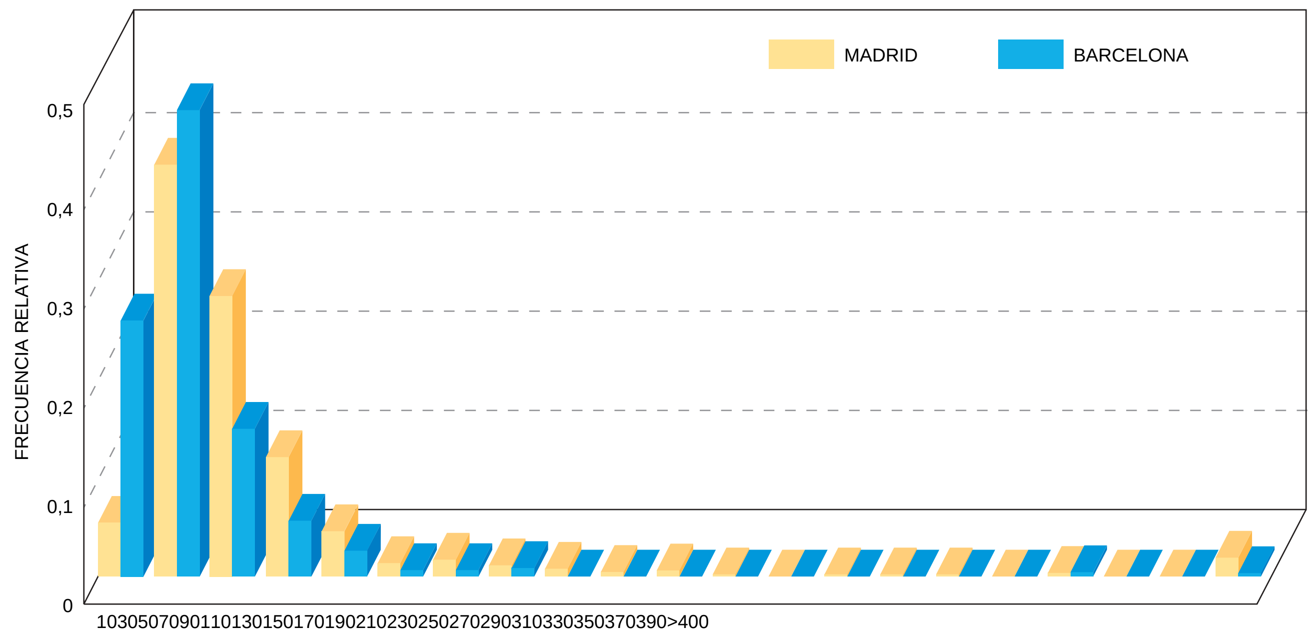
El protocolo de medida adoptado fue el recomendado por Oficina norteamericana de Protección del Ambiente. En él se estipula que el muestreo debe hacerse en los meses de invierno, en el piso más bajo que esté ocupado de la vivienda y bajo condiciones de “casa cerrada” (la vivienda debe haberse cerrado al menos 12 horas antes de la recogida de la muestra). La evaluación de la eficacia de este protocolo ha demostrado que la distribución de las concentraciones de radón observada es casi idéntica a la obtenida en el caso de medidas de largo período de exposición realizadas en las mismas viviendas.

Los valores recogidos siguen una distribución logarítmica normal y cubren un rango de tres órdenes de magnitud, desde <10 becquerels por metro cúbico a 15.400. La media geométrica del conjunto es 41,1 becquerels por metro cúbico, no muy diferente de la de otros países de la Unión Europea. La media aritmética calculada es de 86 becquerels por metro cúbico, que baja a 62 cuando se introduce la hipótesis de que la concentración de radón en apartamentos es la mitad que en casas unifamiliares y promediando el valor de acuerdo con la distribución nacional del tipo de viviendas. Aproximadamente un 9 por ciento de las casas mostraron concentraciones mayores de 200 becquerels por metro cúbico, un 4 por ciento superaron los 400 y un 1,2 por ciento excedieron de 1000 becquerels.

La distribución por regiones evidencia una gran variabilidad. Los valores de media geométrica más altos corresponden a las regiones de Galicia (117,6 becquerels por metro cúbico), Madrid (94,9), Extremadura (89,8) y Canarias (85,9), siendo los más bajos los de Valencia (17,6 becquerels por metro cúbico), La Rioja (18,5) y Navarra (19,8). Cierta localidad de la zona minera de uranio del oeste del país mostró una media geométrica de 819 becquerels por metro cúbico, y 12 de las casas medidas resultaron con una concentración de radón por encima de 1000.

Tales datos del radón concuerdan con los obtenidos en la vigilancia de radio en agua y suelos de la zona y los de tasa de dosis externa por radiación gamma. Puede considerarse, por tanto, probable que esta vigilancia nacional represente un buen cuadro de la distribución del radón en las viviendas de España, aunque quedan aún por identificar algunas áreas susceptibles de acumulación de altos niveles.

Las áreas urbanas requieren una especial atención, debido al gran número de personas potencialmente expuestas a la acción del gas. Las dos mayores ciudades de España, Madrid y Barcelona, representan, juntas, un importante porcentaje de la población total de nuestro país. Por esta razón ambas ciudades fueron el objeto de una campaña preliminar de vigilancia en 1990 y otra de mayor magnitud en 1991 y 1992, realizadas por el CIEMAT y un equipo de la Universidad Autónoma de Barcelona. En ambos casos se utilizó un detector expuesto durante períodos de entre 3 y 6 meses en varios centenares de viviendas.



Distribución de radón en viviendas de Madrid y Barcelona 1991-1992

Los resultados de la segunda campaña, considerada la más representativa por el período de exposición más largo y el mayor número de viviendas vigiladas, dieron una media geométrica de 45 y 28 becquerels por metro cúbico, para Madrid y Barcelona respectivamente. En Madrid el 3 por ciento de las medidas excedieron los 200 y el 1,8 por ciento estuvo por encima de los 400 becquerels por metro cúbico. Para Barcelona los resultados correspondientes fueron del 0,4 % y del 0,1 %. Las concentraciones más altas en Madrid se asociaron con casas construidas sobre suelos arcósicos (arenas arcósicas) con contenidos en radio típicamente altos. Los suelos de origen sedimentario predominantes en Barcelona explican los valores más bajos de la concentración de radón. Como se ha observado en campañas similares, los niveles de radón son menores en apartamentos que en casas unifamiliares. La distribución global se ajusta a una curva logarítmica normal.

Se han emprendido también otras campañas de vigilancia de carácter regional y local, la mayoría de ellas con períodos de exposición de varios días. En estas campañas se incluyen la vigilancia de 57 viviendas en las Islas Canarias, 449 medidas en la región valenciana y 60 en la catalana. Además, un equipo de la Universidad de Cantabria ha medido radón en 386 casas de 16 localidades diferentes de Cantabria y en 107 casas de ocho localidades de la Sierra de Guadarrama, en el noroeste de Madrid. Estas dos últimas campañas siguieron la pauta descrita a propósito de la vigilancia nacional.

Los resultados obtenidos de las campañas de vigilancia desarrolladas en Cataluña y Cantabria han dado valores similares a los correspondientes a la campaña nacional. Sin embargo, en el área valenciana la media geométrica de los datos obtenidos de la concentración de radón es casi dos veces mayor que la de la vigilancia nacional. En un 6 % de las viviendas se han obtenido niveles que superaron los 200 becquerels por metro cúbico, llegando a alcanzarse el valor de 2680. Algunas de las concentraciones más altas se han encontrado en zonas calizas carstificadas, debido a la acción de las aguas subterráneas.

En el caso de la zona correspondiente a la Sierra de Guadarrama, donde la roca predominante es el granito, la media geométrica es de 155 becquerels por metro cúbico; los datos oscilan en un intervalo de 23 a 1573, con el 24 por ciento de los resultados por encima de 200 becquerels por metro cúbico. Se han encontrado grandes diferencias en la concentración de radón en las distintas poblaciones incluidas en esta campaña de vigilancia.

Por lo que se refiere a las islas, en 6 de las 47 viviendas muestreadas en Tenerife se superó la concentración de 200 becquerels por metro cúbico. El sustrato era basáltico. El valor individual más alto obtenido en la isla de Fuerteventura fue de 93.

Hasta la fecha se han realizado unas 3500 medidas de radón en viviendas en España. Las diferencias en la metodología utilizada para la vigilancia, los procedimientos de medida y, quizá también, el tamaño de la muestra son los causantes de la variabilidad de los resultados obtenidos. Ninguna de las vigilancias se ha diseñado de manera totalmente aleatoria, lo que podría incidir en la variabilidad observada entre las diferentes campañas. Sin embargo, pese a la diferente magnitud de las vigilancias y las diversas metodologías utilizadas, las campañas ofrecen, en conjunto, una información global que puede considerarse representativa de la realidad española.

España no ha adoptado aún formalmente ningún nivel de referencia para radón en viviendas. En su defecto, suelen utilizarse valores de 200 becquerels por metro cúbico para las viviendas existentes y 400 para las de nueva construcción, tal como se recomienda por parte de la Unión Europea y otras organizaciones internacionales. Las estimaciones actuales del riesgo debido al radón sugieren que la exposición durante toda la vida a una concentración media de 200 becquerels por metro cúbico representa un 2 % de probabilidad de desarrollar un cáncer de pulmón. Estos factores de riesgo se promedian sobre el total de la población (fumadores y no fumadores); se estima que los riesgos para fumadores son alrededor del doble del 2 % mencionado, mientras que para los no fumadores el factor de riesgo se reduce aproximadamente a la quinta parte.

De la comparación con otros riesgos —alcohol (2,5 %), accidentes domésticos (1,7 %) y accidentes de tráfico (1,25 %)— se desprende que ciertas situaciones de exposición merecen atención, ya que un porcentaje significativo de la población puede estar expuesto a un nivel de riesgo, debido al radón, mayor que los citados. Sin embargo, para decidir la asignación justa de recursos a la reducción del riesgo, se necesita una definición mejor de la extensión del problema. Mas, para alcanzar dicha definición, conviene proseguir con el programa nacional de radón.

P. A. Colgan, B. Robles
y J. Gutiérrez
Instituto de Medio Ambiente,
CIEMAT, Madrid

Filología clásica

Aportación hispana

En el Instituto de Filología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de Madrid, un equipo de unos 15 colaboradores fijos y a tiempo parcial está llevando a cabo una obra cuyo alcance trasciende el de la lexicogragía al uso. Me refiero al *Diccionario Griego-Español.* Se han publicado ya cuatro volúmenes (1980-94) y el quinto, que alcanza hasta casi el final de la letra delta, aparecerá próximamente, manteniendo un ritmo de publicación de un nuevo volumen cada tres años.

Cuando el *Diccionario Griego-Español* (en adelante DGE) esté terminado será con mucho el más extenso diccionario que vierta el griego antiguo (desde el micénico del siglo XIII a.C. hasta el año 600 d.C., aproximadamente) a una lengua moderna, el español.

Toda la lexicografía occidental arranca de la lexicografía griega antigua, a partir fundamentalmente de la época alejandrina. Con mayor razón depende de ella la lexicografía griega moderna, a través de jalones que culminan en el diccionario actual más extenso, el *Greek-English Lexicon* de Liddell-Scott-Jones (*LSJ*). Pero este excelente diccionario, cuya última edición apareció en los años 1925-40, se había quedado necesariamente atrasado a pesar de sus suplementos. El léxico griego exigía una reconsideración a fondo. Ello suponía, entre otras cosas, la incorporación del griego micénico, el léxico cristiano y los nombres propios y topónimos, parcelas todas ellas ausentes del *LSJ*. Por otra parte, el enorme desarrollo de los estudios de indoeuropeística a lo largo del siglo XX reclamaba también la introducción de apartados etimológicos renovados.

Por eso nos lanzamos, ya en los años sesenta, en la época preinformática, a la ambiciosa empresa de hacer un diccionario mucho más

moderno, científico y completo que los anteriores. Era algo absolutamente necesario para el conocimiento de la lengua y la cultura griegas, que son la base de las de todo Occidente.

Como dato significativo, diremos que la extensión del DGE viene a ser aproximadamente triple de la del *LSJ*. Por otra parte, el DGE introduce criterios semánticos modernos en la organización interna de los artículos. Sobre este tema puede consultarse el volumen colectivo *Introducción a la Lexicografía griega*, donde quedan sentadas las bases teóricas de la obra. Para esta y otras cuestiones de diverso tipo, remito también a los prólogos de los volúmenes aparecidos y a otras publicaciones.

Con respecto al griego micénico, decidimos hacer un diccionario especial del mismo, unido al DGE por referencias cruzadas. Es obra de nuestro colaborador F. Aura Jorro y es hoy día considerado internacionalmente el diccionario estándar del léxico micénico.

Sucede además que el léxico griego es casi inagotable: cada día aparecen en inscripciones, papiros y manuscritos nuevas palabras, cada día mejora el conocimiento de todas ellas gracias a numerosos estudios generales o de detalle. El DGE aprovecha las modernas ediciones de los textos antiguos, literarios o documentales, así como los incesantes avances en su interpretación. Ello exige un esfuerzo continuado por mantener al día nuestra biblioteca en lo relativo a nuevas ediciones de referencia para autores y textos documentales así como a bibliografía sobre lexicografía griega (índices, léxicos, concordancias, estudios diversos, etc.). Mayor aún es el esfuerzo por estudiar toda esa masa bibliográfica para el diccionario. Un resultado visible de ese esfuerzo será la *Bibliografía de la Lexicografía Griega*, de próxima publicación, obra de nuestra colaboradora P. Boned. Se trata de un repertorio de índices, léxicos y concordancias de los autores antiguos así como de estudios lexicológicos sobre el vocabulario griego.

Todo este trabajo se ha venido realizando mediante el estudio directo de textos, índices, concordancias, léxicos, ediciones comentadas y diversa bibliografía en libro y artículos. Ahora bien, a partir de un cierto momento los métodos informáticos han comenzado a intervenir de modo más o menos decisivo en las diversas tareas de que consta la realización del diccionario, esto es, en los sucesivos estadios en el procesamiento de la información, desde la recogida de materiales hasta la impresión final de los volúmenes.



Sala de griego del Instituto de Filología del CSIC, de Madrid

En la fase de documentación, los datos lexicográficos extraídos del estudio de la bibliografía así como otro tipo de información de referencia se almacena en bases de datos diseñadas al efecto. Otra información procede de los bancos de datos con textos griegos antiguos, especialmente el *Thesaurus Linguae Graecae* de Irvine (California), con el que colaboramos. Mediante programas existentes o diseñados por nosotros mismos aprovechamos estos instrumentos de trabajo. Posteriormente, redactamos los artículos del diccionario directamente en el ordenador, con la gran flexibilidad que ello supone. El original del diccionario se introduce después en una base de datos creada por nosotros. Esta base de datos permite por un lado controlar de modo riguroso diversos aspectos formales del diccionario y, por otra, posibilita la revisión conjunta de diferentes categorías de información. Destaca la creación de listados alfabéticos de las citas de referencia para su revisión. Además permite extraer toda clase de datos estadísticos del Diccionario. Por último, en el volumen actualmente en prensa hemos abordado por primera vez la autoedición del diccionario. Hay que añadir aquí que el vol. I, que es de la era preinformática, ha sido introducido ya en el ordenador con ayuda de un programa de OCR y se está totalmente reelaborando con muchísimos materiales nuevos o revisados. Se podrá, de esta manera, mantener la obra siempre al día.

Todo esto ha abierto nuevas posibilidades y ha facilitado nuestro trabajo y aumentado nuestro ritmo. Pero hay que hacer constar por un lado que nos vemos en la necesidad de buscar soluciones a problemas nuevos, técnicos y de otro tipo. Digamos por ejemplo que la gran masa de información a nuestra disposición requiere a menudo, en contra de lo que pudiera pensarse, un esfuerzo crítico suplementario. La informática no excluye, ni mucho menos, el estudio directo de las fuentes y la bibliografía y el esfuerzo de reflexión que supone organizar artículos a menudo complejos. Piénsese que el volumen actualmente en fase de revisión incluye cerca de sesenta mil referencias seleccionadas en un *corpus* millonario.

Digamos por último que la obra se inició en una época en la que en España un trabajo de equipo en humanidades, pensado a largo plazo, resultaba quijotesco. Pasado el tiempo, estamos satisfechos de que, gracias a un apoyo institucional continuado, muy especialmente del CSIC, el proyecto se ha consolidado y goza de gran prestigio internacional, que se traduce entre otras cosas en una presencia creciente en la literatura científica.

FRANCISCO RODRÍGUEZ ADRADOS
Instituto de Filología-CSIC.
Madrid

De cerca

Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

Mono capuchino

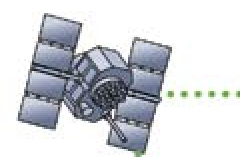
El caí o capuchino común es, entre los monos americanos, uno de los más conocidos, por su número, presencia en parques zoológicos y amplia distribución. Ocupa la cuenca amazónica y selvas subtropicales de Paraguay, Argentina y Brasil. De la familia de los cébidos (*Cebus apella*), debe su popularidad a su régimen alimenticio y notable adaptabilidad para explotar el hábitat en que se encuentra. Vive en bosques muy dispares: pluviselvas primarias y secundarias (explotadas por el hombre), bosques de galería, selvas caducifolias y otros. Se alimenta, sobre todo, de productos vegetales, pero no desprecia la carroña y come los animalillos que encuentra, desde artrópodos hasta ratas, lagartijas, avecillas y huevos de aves.

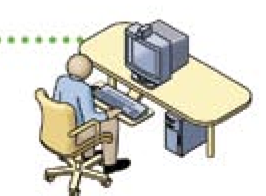
En su régimen frugívoro, bebe néctar, come frutos de palmeras, higuerones, guarumos y le gustan todo tipo de semillas y frutos maduros. Por mor de esa actividad constituye un elemento fundamental para la propagación de árboles y arbustos, que fían en él para el transporte de sus semillas, directa o indirectamente; en el segundo caso, a través de sus excrementos, en donde permanecen semillas viables que han pasado sin sufrir alteración por el tubo digestivo.

Estábamos en el estado brasileño de Amazonas. Sentados en una plataforma a media altura de un gran árbol, dispuestos a fotografiar animales del estrato medio y del dosel. Apareció un grupo de unos cinco caís que permanecieron en las cercanías. Un ejemplar supuestamente juvenil, aún curioso, se acercó lo suficiente para que pudiéramos fotografiarlo con un 300 milímetros luminoso apoyado con dos flashes supletorios.







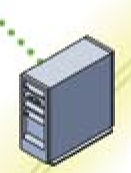


CONSULTA A DISTANCIA
El servidor de videoconferencia permite a los médicos consultar a otros especialistas para recabar información complementaria sobre casos clínicos.

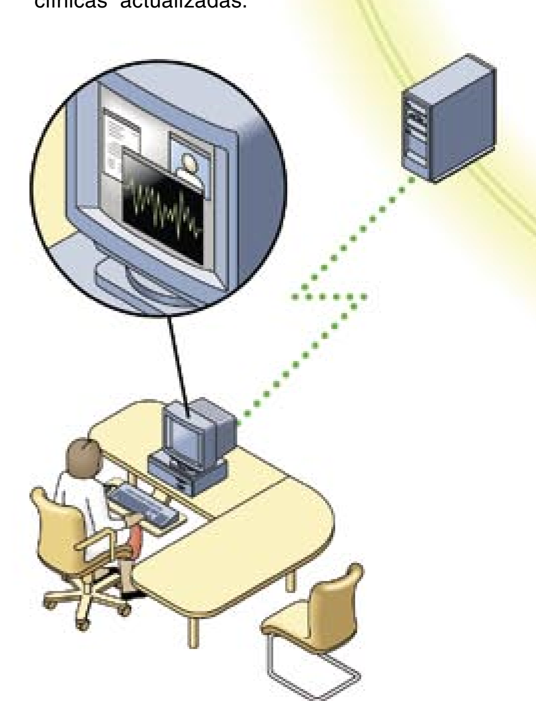
Programación para redes fiables

Ciertas técnicas, que capacitan a los sistemas de computación distribuida para reorganizarse a sí mismos, pueden lograr el restablecimiento del servicio aun cuando falle alguna de sus partes

Kenneth P. Birman y Robbert van Renesse

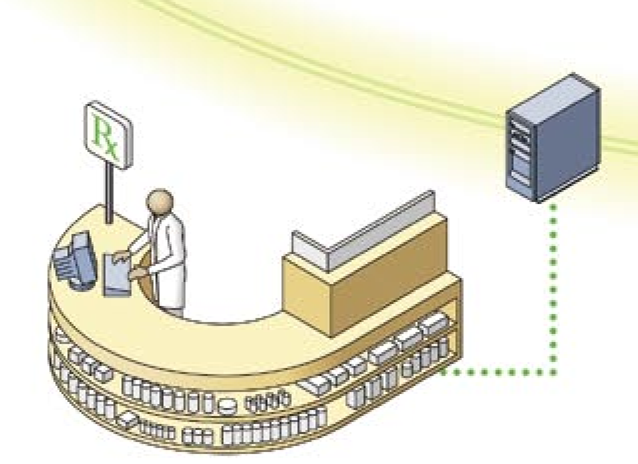


MEDICO
Desde un consultorio particular en otro edificio, el médico puede supervisar a los pacientes hospitalizados. El médico puede tener acceso a parámetros vitales, como las frecuencias respiratoria o cardíaca, a los resultados de las pruebas de laboratorio o a historias clínicas actualizadas.



"Surfear" por Internet ha dejado de ser un pasatiempo seductor. Un número cada vez mayor de organizaciones de todo tipo, desde compañías de informática hasta empresas editoriales, están valiéndose de servicios "en línea" que operan de modo muy similar al de World Wide Web, "la Telaraña", como suele llamarse en español. Este tipo de servicios puede facilitar el tratamiento de informaciones importantes, acelerar la adopción de decisiones y mejorar la eficacia de una organización. Pero conforme son más las instituciones que dependen de la nueva técnica, muchas son también las expuestas a los inconvenientes de las redes informáticas. Inconvenientes que les resultan particularmente obvios a los usuarios de sistemas de computación distribuida, los cuales concatenan programas, servidores y archivos de datos dispersos por una amplia red de ordenadores y terminales.

Como bien saben todos los usuarios de ordenadores, los programas que operan en redes son propensos a fallar. Leslie B. Lamport, de Digital Equipment Corporation, uno de los precursores de los sistemas



FARMACIA
La farmacia del hospital también añade información a las historias de los pacientes, consignando en qué momentos le fueron dispensadas las medicaciones prescritas. Una información exacta relativa a todos los medicamentos recibidos por un paciente ayuda a impedir peligrosas interacciones entre fármacos.

LABORATORIO
Para garantizar que los médicos y las enfermeras no tomen decisiones basadas en datos caducos, el servidor que almacena los resultados de laboratorio se replica en diversos servidores repartidos por el sistema. Si el servidor primitivo resulta inalcanzable por una razón cualquiera, se encaminan las peticiones de datos hacia otros nodos.

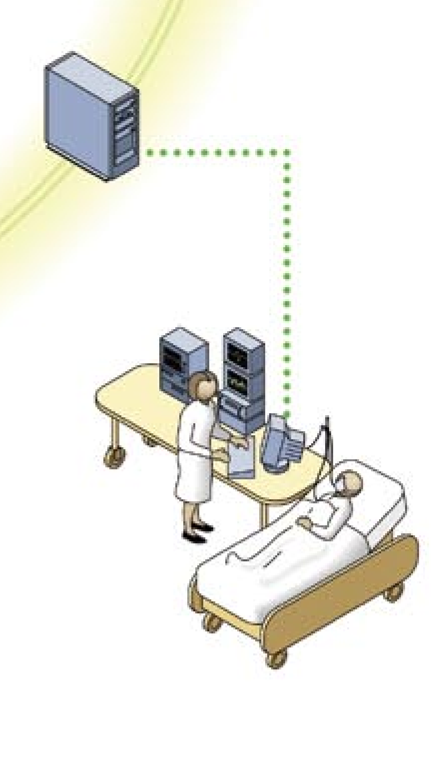
de computación distribuida, los definió como "sistemas en los que el fallo de un ordenador de cuya existencia ni siquiera teníamos noticia puede hacer inutilizable al nuestro". La Telaraña, desde luego, no está exenta de fallos. A finales de 1995, los usuarios de la Telaraña dieron cuenta de varios "semiapagones", durante los cuales la comunicación por Internet resultó en gran medida imposible. Tales fallos se han atribuido a causas diversas; entre ellas, deficiencias de la programación, sobrecargas de tráfico en las líneas de comunicación y sobrecarga o fallo completo de los servidores de la Telaraña, que son los ordenadores donde se almacenan los documentos a los que acceden los usuarios desde sus estaciones de trabajo. Lo más verosímil es que a tales apagones haya contribuido una combinación de factores. Por desgracia, con la expansión de las redes informáticas —y no sólo de la Telaraña, sino también de los sistemas de informática distribuida instalados en bancos, universidades y en oficinas— tales fenómenos se van a multiplicar.

A veces, cuando los ordenadores fallan, las pérdidas se reducen al tiempo y el buen humor del usuario. Aunque el cajero automático más cercano no funcione, quizá lo haga el del banco de enfrente. Pero cuando quedan inutilizadas redes muy complejas, las consecuencias pueden ser temibles. El 15 de julio de 1994, el mercado de valores NASDAQ, de funcionamiento exclusivamente informático, abrió con dos horas de retraso a causa de un misterioso problema que había puesto en peligro el sistema entero. Se creyó al principio que el desencadenante del apagón había sido una "chinche" de la programación; el error acabó localizado en un disco de funcionamiento defectuoso. Dado que el retraso en la apertura fue de sólo un par de horas, los ingresos perdidos no alcanzaron una cota preocupante. Pero el accidente pudo haberse trocado en catástrofe: el mercado hubiera sufrido pérdidas enormes de no haber empezado la sesión cuando lo hizo.

En otro ejemplo, fechado en enero de 1990, la red telefónica AT&T sufrió una interrupción del servicio a gran escala, provocada por el fallo de una central electrónica del sistema. Automáticamente se desviaron las llamadas hacia una central de reserva, la cual también quedó fuera de servicio debido a un fallo en su programación. La avería se propagó por la red, provocando un bloqueo a gran escala de nueve horas de duración, durante las cuales 60.000 personas quedaron sin servicio telefónico y no pudieron atenderse 70 millones de llamadas. Para quienes están familiarizados con los problemas que plantea la gestión de una red, aunque sea sencilla, lo sorprendente no es que se den tales vicisitudes,

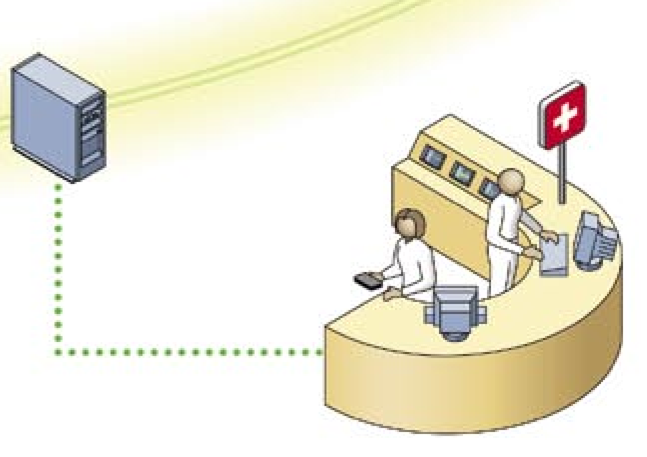


ATENCION DE CABECERA
El servidor de fichas médicas almacena información sobre parámetros vitales, como la frecuencia cardíaca o la presión arterial, así como los momentos en que el paciente recibió medicación. Esta información ha de estar permanentemente a disposición de médicos y enfermeras; el sistema garantiza su accesibilidad duplicando los datos y los programas encargados de gestionarlos.



1. UN FUTURO SISTEMA INFORMATICO hospitalario conectaría a los pacientes con personal médico presente en el edificio o en cualquier otro lugar del mundo. Dado que el fallo de un ordenador pudiera entrañar riesgos para los pacientes, tales sistemas podrían valerse de la duplicación activa para afrontar las averías.

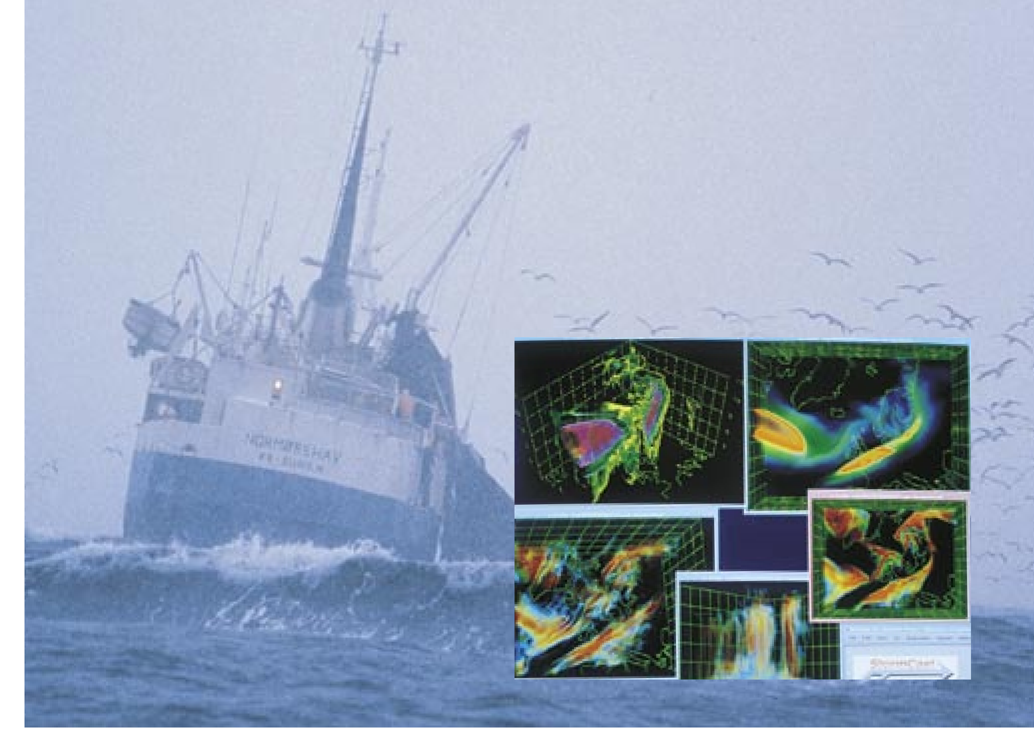
ESTACION DE ENFERMERIA
Las enfermeras actualizan con frecuencia las fichas de los pacientes, introduciendo nueva información en el sistema, sea en terminales repartidas por el hospital o sirviéndose de terminales de mano.



sino, por el contrario, que no sean más frecuentes.

En sistemas distribuidos, hasta un fallo de breve duración puede convertirse en grave problema si se trata de servicios que han de funcionar las veinticuatro horas del día. Las redes de control de tráfico aéreo y las de los sistemas financieros no sólo han de exhibir una fiabilidad excepcional, sino que su información ha de ser puesta al corriente sin cesar. Un mensaje que diga "el ordenador central no responde" o una pantalla que ofrezca información errónea sobre el curso de vuelo de un avión podrían fácilmente provocar un accidente o un quebranto económico. Al tiempo que prosigue la transformación de los modos de vivir y trabajar, la seguridad y la estabilidad de las finanzas, de los bienes de las personas, e incluso su salud, va a depender cada vez más de sistemas informáticos distribuidos. Así pues, aunque resulta fácil hablar de los hipotéticos beneficios que aportará la autopista de información, creemos que los puentes que interconectan a los ordenadores deben inspeccionarse más de cerca. Diversos científicos informáticos —entre ellos los autores— han venido trabajando desde finales de los años setenta en el desarrollo de programas destinados a perfeccionar las redes informáticas de procesamiento distribuido, con el propósito de hacerlas más seguras y resistentes a los fallos, actividad que los especialistas denominan diseño de sistemas robustos de procesamiento distribuido.

¿Por qué razón fallan los sistemas distribuidos? Dejando aparte las averías atribuibles a errores de gestión o a un diseño deficiente, el caso más típico consiste en que en algún punto de la red surge un problema aislado, y éste desencadena una serie de acontecimientos responsables de que los programas de la red vayan interrumpiéndose uno tras otro. Ante riesgos de este tipo, una de las precauciones podría consistir en reforzar los componentes individuales, por ejemplo, incorporando ordenadores y discos especialmente diseñados para tolerar fallos. Pero aun así puede ocurrir que los techos tengan goteras causantes de cortocircuitos, que la energía eléctrica sufra fluctuaciones, que un descuido corte las conexiones de las comunicaciones. También los actos de sabotaje de empleados resentidos o los ataques de piratas informáticos pueden poner en situación apurada a un sistema distribuido. Los ingenieros y los programadores pueden mejorar la duración de equipos y programas, pero nunca se podrá lograr que un ordenador sea absolutamente seguro.



2. RED DE OBSERVACION METEOROLOGICA que alerta a los pescadores noruegos de tormentas peligrosas (*izquierda*) o derrames de crudo (*derecha*). El

KENNETH P. BIRMAN y ROBBERT VAN RENESSE han colaborado durante los cinco últimos años en sistemas de procesamiento distribuido. Birman es profesor de informática en la Universidad Cornell. Tras desarrollar el protocolo instrumental Isis en los años ochenta, fundó una compañía para comercializar su técnica. En la actualidad, Isis Distributed Systems opera con carácter de división de Stratus Computer, Inc. Van Renesse ingresó en el campo de la computación distribuida tras decidir abandonar la carrera de acróbata de circo. Ha sido el principal arquitecto del sistema Horus. Se halla adscrito a la Universidad de Cornell.

El cuento no acabaría aquí, ni aun cuando cada componente de un sistema fuera de fiabilidad extrema. Para obtener un sistema distribuido robusto no basta con interconectar ordenadores seguros y programas perfectamente depurados. Lo que así se obtiene es, tan sólo, un sistema que funciona bien en casi todas las circunstancias. Los programas de correo electrónico, los boletines y la Telaraña se proyetaron utilizando componentes que, uno por uno, son muy de fiar. Sin embargo, es frecuente que tales sistemas queden bloqueados cuando a uno de los componentes del sistema le sucede algo inesperado; por ejemplo, el sistema puede venirse abajo cuando alguna de las máquinas o de las líneas de comunicaciones sufre una sobrecarga. Se requiere, por tanto, alguna forma complementaria de protección.

A lo largo de los dos últimos decenios, los programadores han venido estudiando el problema de la fiabilidad y han preparado programas tolerantes a los fallos, vale decir, programas que permiten a los sistemas informáticos un restablecimiento del servicio normal aun cuando se produzcan averías. La técnica consiste en eliminar las cadenas de dependencias internas que vinculan el funcionamiento del sistema entero al funcionamiento los componentes individuales. Los sistemas resultantes no tienen por qué parar cuando alguno de sus nodos queda fuera de servicio. Lo que hacen, en cambio, para restablecerlo es proceder rápidamente a reconfigurar el sistema, permitiendo que funcione sin recurrir a los servidores inutilizados.

Los científicos informáticos dan a estas organizaciones el nombre de sistemas distribuidos de alta disponibilidad. Puesto que tales sistemas están diseñados de modo que dupliquen sin cesar la información crítica y de que distribuyan múltiples copias de respaldo entre sus ordenadores individuales, se adaptan a condiciones cambiantes: malfuncionamiento del disco en cierto punto, sobrecargas en otro, desconexión de un enlace de comunicaciones, etcétera. Mientras los fallos no sobrevengan con tanta rapidez que los programas carezcan de tiempo para reaccionar, estos sistemas pueden responder reco-



sistema informático StormCast enlaza cámaras de vídeo, estaciones meteorológicas y satélites con la finalidad de suministrar informes fiables y actuales.

brando de otros lugares un duplicado de un archivo necesario o una copia de un programa "en línea". De este modo, el sistema, entendido en su integridad, sigue estando disponible, e idealmente, proporcionando servicio ininterrumpido a los usuarios que todavía permancen conectados.

Un método sencillo y popular de construcción de sistemas distribuidos de alta disponibilidad se vale de un sistema primario más otro de reserva o "respaldo". Si el equipo primario falla, se pone en marcha el de reserva. La conmutación entre ambos es sencilla si los datos nunca cambian; empero, la conversión se torna dificultosa si los datos o los archivos cambian mientras el sistema está en funcionamiento. Y en una red de gran extensión, que integra muchos servidores, datos, archivos y programas, puede no ser fácil distinguir si un sistema ha quedado bloqueado o si está experimentando meras dificultades de comunicación.

Supongamos que un ordenador está tratando de actualizar información lo mismo en el servidor primario que en el de reserva, pero uno de ellos deja de responder a mensajes. Si el problema reside en las líneas de comunicación, los mensajes, si se les concede el tiempo suficiente, acabarán por llegar. Pero si se tratase de una auténtica avería del servidor, el ordenador que está poniendo los datos al corriente permanecería indefinidamente a la espera; en el ínterin, el sistema no sería utilizable. Por otra parte, si el ordenador que trata de poner los datos al corriente deja de esperar y envía la información actualizada a uno de los servidores nada más, el servidor primario y el de reserva dejarán de ser idénticos. Cuando el sistema se proponga utilizar el servidor desfasado se producirán errores.

El mercado financiero NASDAQ muestra una forma de resolver este dilema. La red dispone de dos servidores centrales para efectuar las transacciones. Para evitar confusiones, en cada instante considerado solamente se encuentra activo uno de ellos. Los operadores de NASDAQ deciden según su criterio cuándo se ha de pasar al servidor de reserva. Desdichadamente, muy pocos sistemas distribuidos pueden basarse en la prudencia de operadores humanos para detectar los fallos y proceder a conmutar la red entera de un servidor a otro. Antes bien, los programadores han de automatizar esta decisión y han de hacerlo de modo que las transiciones se produzcan suave e imperceptiblemente.

Además, es frecuente que los sistemas distribuidos de alta disponibilidad consten de un gran número de servidores y programas. Lo típico, en consecuencia, es que tales sistemas mantengan una "lista de altas y bajas", que le sigue la pista a cada programa y comprueba si está o no funcionando. Si un programa, por la razón que sea, no responde, se le marca como defectuoso. El sistema, al detectar un fallo en un determinado punto, puede reconfigurarse a sí mismo y encaminar el trabajo hacia los nodos o dependencias que sigan operativos.

El sistema NASDAQ pone también de manifiesto una segunda causa de preocupación referente a la fiabilidad de los sistemas distribuidos. El retraso de dos horas en la apertura de transacciones que sufrió el sistema en 1994 pudo haberse evitado si los operadores hubieran conectado de inmediato el ordenador de reserva. Optaron por esperar, sin embargo, temiendo que la causa del fallo del ordenador primario pudiera ser un defecto de programación. En tal caso, también hubiera podido fallar el ordenador de reserva, que fue precisamente lo que le ocurrió al sistema de AT&T. Siendo imposible garantizar la depuración absoluta de los programas, resulta necesaria alguna forma de protección, para reducir el riesgo de que las versiones de reserva de un servidor crítico se vengan abajo tras el fallo de un servidor primario.

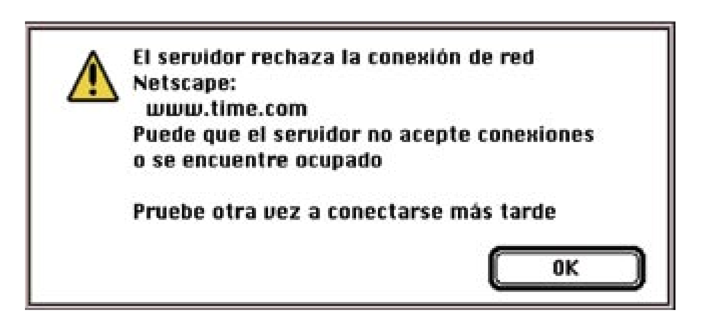
Los programadores han abordado este problema mediante la duplicación activa. En esta técnica, el soporte lógico de un sistema establece copias redundantes de los programas o los servidores vitales valiéndose de los grupos de proceso. Un grupo de proceso concatena una colección de programas que cooperan estrechamente. Un sistema distribuido puede contener muchos grupos de proceso, y los programas pueden pertenecer a varios de tales grupos. Cada grupo, que responde a una denominación muy similar a un nombre de archivo, posee su propia lista de miembros de alta. Y algo de máxima importancia es que el grupo de proceso proporciona un medio para enviar mensajes a sus miembros. Esta función de circulación de mensajes garantiza que cada miembro del grupo reciba el mismo mensaje en el mismo orden, aun cuando el remitente se averíe mientras transmite el mensaje.

Si para mantener el sistema en servicio hace falta un determinado programa, el sistema introduce un grupo de programas, cada uno de los cuales es copia fiel del original. Para poner al corriente los datos gestionados por el programa copia, el sistema envía un mensaje al grupo de proceso. Cada miembro reacciona poniendo al corriente su copia particular. Dado que todos los programas ven las mismas actualizaciones en el mismo orden, se mantendrán en estados mutuamente coherentes.

La duplicación activa faculta a un sistema para tolerar fallos, porque cualquier miembro del grupo es capaz de

La Telaraña en confusión

La mayor parte de la World Wide Web —la Telaraña— es invisible. Para muchos usuarios, la Telaraña parece tener sólo dos componentes: un programa hojeador y servidores distantes, en los cuales se hallan almacenados los documentos que nos interesan. Pero la Telaraña —e Internet, medio de comunicación que conecta los nodos de la Telaraña— consta de millones de programas y servidores más; para la recuperación de un solo documento son docenas los que han de cooperar. Por ejemplo, para buscar un elemento ubicado en un servidor de la Universidad Cornell, es preciso traducir (“mapear”, en la jerga) el nombre “www.cornell.edu” convirtiéndolo en una dirección numérica reconocible por los programas. De esta tarea puede tener que ocuparse una serie de programas de traducción, hasta que se localiza la dirección correcta. Además, una petición de conexión con un nodo de la Telaraña pasa normalmente por una serie de



programas “intermediarios” (“proxies”), que guardan copias de documentos de acceso frecuente, con el fin de reducir la carga sobre los servidores de la Telaraña más distantes. Si un intermediario cercano dispone ya del documento necesario, el usuario puede evitar la laboriosa transmisión de un archivo por Internet.

Esta dependencia invisible de programas intermediarios es corriente en los sistemas distribuidos, pero puede provocar fallos del sistema. Si falla un programa de traducción del nombre de un programa, si el apoderado yerra o si un servidor de la Telaraña se avería, la petición inicial no prosperará. Por esta razón, el ubicuo mensaje de error que advierte que el servidor de la Telaraña ha fallado o está ocupado (*arriba*) puede inducir a confusión: una sobrecarga o el fallo de cualquier número de programas intermedios puede producir tal resultado.

La propia Internet, globalmente considerada, puede sufrir “apagones” muy parecidos a un corte de suministro eléctrico o a la saturación de líneas telefónicas. A este respecto, en 1995 uno de los principales proveedores de Internet, radicado en Atlanta, sufrió una serie de sobrecargas intermitentes. Durante tales períodos, nadie pudo en la Telaraña recuperar documentos de los servidores cuyas direcciones no le fueran conocidas ya al sistema local. Este tipo de apagones a medias puede afectar a gran número de personas en todo el mundo. Pueden presentarse errores incluso después de haberse establecido la conexión con un servidor. Las copias guardadas por los intermediarios de la Telaraña no se ponen al corriente cuando se actualiza el documento original, por lo que no existe garantía de que los usuarios vayan a ver la versión más moderna de una página de la Telaraña. En muchas situaciones, esta posibilidad no crea problemas de importancia, pero en ciertas aplicaciones donde el tiempo es esencial pueden tornarse poco fiables si los documentos necesarios no se mantienen al corriente. Los intermediarios de la Telaraña mejoran la fiabilidad de Internet al reducir la carga a procesar por la red; sin embargo, estos intermediarios la reducen ante la posibilidad de que muestren información caduca.

Los proyectos críticos basados en la Telaraña o en otros sistemas de procesamiento distribuido van a exigir mayores garantías de que la información recuperada del sistema sea fiel, actualizada y disponible siempre que sea necesaria. Una de las formas de evitar tales errores consiste en hacer que la copias de información vital guardadas en el sistema se gestionen mediante el proceso de duplicación activa descrito en el artículo.

gestionar cualquier solicitud: si uno de los equipos falla, se puede encaminar el trabajo hacia otro nodo que siga en servicio. Además, si el encargo no entraña la modificación de datos, puede atenderlo un solo nodo, sin necesidad de implicar en él a todo el sistema. De esta forma resulta posible hacer que varios programas diferentes trabajen a la vez en diversas tareas, acelerando la aplicación merced al procesamiento en paralelo.

Resulta evidente que, si todos los miembros de un grupo de proceso gestionan un mensaje entrante de igual y errónea manera, todos los miembros podrían, en teoría, venirse abajo simultáneamente. Cabría pensar que la duplicación activa es vulnerable a fallos de este tipo, pero no hay tal. Los programadores han observado que los errores que con mayor probabilidad se pasan por alto al ensayar los programas conciernen al orden de recepción de los datos. Estos fallos solamente pueden provocarlos secuencias o distribuciones temporales de acontecimientos muy poco probables. Cuando un sistema se vale de la duplicación activa, todas las copias ven realmente unas mismas actualizaciones y en un mismo orden; sin embargo, las actualizaciones constituyen sólo una pequeña parte de los encargos que se le hacen a un programa. La mayor parte del tiempo, los programas duplicados operan en paralelo, gestionando cada programa su propio conjunto de tareas en un orden propio y exclusivo. Así, aunque un error de programación logre zafarse a las pruebas e interfiera con unas cuantas partes de una aplicación en red, es improbable que llegue a provocar el fallo simultáneo de todos los miembros de un grupo de proceso particular.

La idea que subyace a la duplicación activa es sencilla, pero no lo es la programación necesaria para ponerla en práctica. La gestión dinámica de listas de altas y bajas y la comunicación con los grupos de proceso constituyen tareas difíciles, especialmente en vista de los fallos que inevitablemente se van a producir y de la pérdida de mensajes. Aunque la computación distribuida se ha tornado en cosa corriente durante los diez últimos años, las técnicas de duplicación activa acaban de salir del laboratorio.

A lo largo de estos últimos años, han sido más de una docena los equipos de programadores que han desarrollado soportes lógicos destinados a sistemas robustos de informática

distribuida. Todos ellos proporcionan alta disponibilidad merced a la duplicación activa, pero cada uno hace hincapié en un aspecto algo diferente. Algunos soportes, por ejemplo, cargan el acento en la velocidad; otros, en la necesidad de seguridad.

Nuestras investigaciones en la Universidad Cornell han aportado dos de tales paquetes de programas. Uno de los autores (Birman) dirigió el equipo que introdujo Isis en 1987; más recientemente, ambos hemos trabajado en Horus, que presentamos en 1994. Los nombres de “Isis” y “Horus” proceden de la mitología egipcia. La diosa Isis ayudó a resucitar al dios Osiris, despedazado tras una batalla con Set, dios de la guerra. Horus era hijo de Isis, y acabó venciendo a Set. Por analogía, los paquetes Isis y Horus pueden facilitar la recuperación de un sistema distribuido desmantelado por un fallo.

Los paquetes como Isis se valen de un conjunto de funciones logicales, que duplican y ponen al corriente los datos, siguen la pista a los grupos de proceso y auxilian en la gestión de los cambios de altas y bajas. Isis puede también repartir el procesamiento de los datos entre varios servidores (“compartición de cargas”). Los sistemas distribuidos que aplican la compartición de cargas ofrecen muchas de las ventajas del procesamiento en paralelo sin requerir para ello máquinas especiales dotadas de procesamiento de este tipo. Al dividir el trabajo entrante entre multitud de servidores que operan en coordinación, Isis faculta a los sistemas para una gestión rápida de tareas grandes. Asimismo, si una aplicación determinada exige mayor capacidad de cómputo, se puede añadir un servidor más, y la técnica de compartición de cargas se adaptará por sí sola al nuevo tamaño del grupo. La posibilidad de mejorar rendimiento y fiabilidad, que Isis y Horus y otros paquetes de instrumentos similares ofrecen, suele sorprender a los proyectistas de su desarrollo, quienes tienden a prejuzgar que conferir mayor robustez a un sistema implica hacerlo más lento y más caro.

La duplicación activa se ha aplicado en cierto número de situaciones, entre ellas, varias redes de telecomunicaciones, mercados de valores, bancos y corretajes. En Noruega, los investigadores han desarrollado un sistema de supervisión medioambiental basado en esta técnica. La agencia francesa de control de tráfico aéreo está igualmente explorando esta técnica para utilizarla en una nueva generación de programas de control de tráfico aéreo. Y las plantas de manufactura han utilizado grupos de proceso para coordinar el trabajo y reconfigurar cadenas de montaje cuando es necesario retirar equipos de la línea para su mantenimiento.



3. LOS PASAJEROS de líneas aéreas sufrieron esperas en el aeropuerto neoyorquino de La Guardia en mayo de 1995, debido a que un corte de energía eléctrica dejó fuera de servicio el sistema local de control de tráfico aéreo. Los esfuerzos por renovar los envejecidos programas de control de tráfico aéreo en los Estados Unidos comenzaron en los años ochenta.

Sin embargo, conforme los científicos informáticos van examinando aplicaciones cada vez más exigentes, van descubriendo que la duplicación activa sufre limitaciones importantes. La compartición de cargas no es siempre posible o deseable: ciertos sistemas (notoriamente, aquellos en que los datos cargados en un servidor cambian con celeridad) quedan frenados por la duplicación de componentes. Por ejemplo, en la técnica de videoconferencia, la duplicación activa sí mejora la tolerancia a fallos de la red de servidores que han de seguir en funcionamiento aun cuando se desconecten algunos participantes. Pero esa técnica supondría un carga para el sistema —sin mejorar su fiabilidad— si se aplicara a la transmisión de datos de vídeo a usuarios distantes.

La necesidad de lograr sistemas más adaptables nos llevó a desarrollar Horus. Lo mismo que el instrumental de Isis, Horus permite la duplicación activa, pero proporciona además versatilidad mucho mayor. La idea esencial en que Horus se inspira es la idea de modularidad; algo así como las piezas de los juegos de construcción infantiles. Los distintos componentes de Horus pueden combinarse a voluntad para atender las necesidades específicas de un determinado grupo de proceso. Uno de los bloques funcionales podría encargarse de la encriptación de datos, a fin de impedir que fisgones y piratas se acerquen al sistema. Otro bloque podría atender a los posibles fallos de comunicación que puedan producirse si los mensajes se pierden o corrompen. Los programadores que utilizan Horus deciden cuáles son las propiedades que su sistema realmente necesita, lo que les permite configurarlo a la medida de la utilización prevista. Además, Horus puede ampliarse con bloques “de encargo” para necesidades especiales que podemos no haber encontrado o previsto en nuestro trabajo. Horus tiene un grupo cada vez mayor de usuarios, repartidos por todo el mundo.

Nuestro trabajo con Isis y Horus nos ha convencido de que una planificación cuidadosa puede garantizar la fiabilidad de las redes de ordenadores. Pero lograr que la autopista de información sea robusta puede exigir más tiempo y más dinero del que los fabricantes de equipos y los usuarios de informática están dispuestos a invertir. La programación para aplicaciones distribuidas está construida, por lo general, utilizando técnica existente, cuyo diseño no se halla centrado en la fiabilidad. Además, los investigadores

necesitan buscar métodos mejores de diseño de sistemas a gran escala que sean a la vez robustos y capaces de rendimientos muy elevados: un sistema que es robusto cuando acceden simultáneamente a él 50 usuarios puede ser intolerablemente lento y, por tanto, poco fiable, si son 5000 quienes lo hacen.

Aunque los programadores han aplicado con éxito la técnica de procesamiento distribuido y robusto a cierto número de ejemplos, el público tiene más información sobre fallos de sistemas no robustos. Por ejemplo, a lo largo de estos últimos años se han dado docenas de noticias relativas a los problemas del sistema actual para control de tráfico aéreo. En otoño de 1995, el sistema de Los Angeles falló y dejó a los controladores imposibilitados para comunicarse con los aviones; la colisión de dos de ellos en el aire logró evitarse por segundos.

Por si fuera poco, se han ido posponiendo y recortando ejercicio tras ejercicio los programas actualizados de control de tráfico aéreo, encargados en 1982 por la Administración Federal de Aviación (FAA). La FAA seleccionó la propuesta original precisamente en razón del innovador enfoque que daba al procesamiento distribuido; parece ahora que los aspectos distribuidos y de alta disponibilidad de los soportes lógicos propuestos han quedado eliminados casi por completo. No obstante, los controladores de tráfico aéreo critican el sistema actual, del que dicen que es inadecuado, especialmente porque carece de una arquitectura de programación distribuida y se ha vuelto poco fiable con los años. Fiascos muy comentados como éste han alimentado el fuego de que existe una crisis en la programación de ordenadores.

Pero si realmente nos encontramos en una crisis de desarrollo de programación, cabe que tal crisis sea tanto de voluntad como de medios. No todos los proyectistas se preocupan de que sus programas sean robustos, y la demanda de fiabilidad por parte del público no parece ir más allá de unas cuantas aplicaciones delicadas. A decir verdad, las compañías que comercializan paquetes de programas para procesamiento distribuido suelen declarar en las licencias de sus productos que éstos pudieran no ofrecer suficientes garantías para aplicaciones críticas, dando a entender que la fiabilidad no constituye un objetivo razonable. A nuestro entender, es como si los fabricantes de automóviles vendieran sus coches con la advertencia de que pueden no ser seguros para la conducción por autopista. Rara vez se aplican en el desarrollo de programas los equivalentes informáticos de los cinturones de seguridad y las bolsas de aire ("airbags"). Y el ansia por interfases refinadas y cómodas, así como de mayor velocidad y rendimiento, tiende a dominar la atención tanto de los diseñadores de programas como de los correspondientes usuarios.

La fiabilidad suele evocar una imagen de sistemas informáticos grandes y lentos que es incompatible con el atractivo del acceso instantáneo y sin esfuerzo a la información de las autopistas de datos. Pero una técnica robusta no tiene por qué ser lenta y antipática de utilizar: el puente Golden Gate constituye un modelo de estabilidad y elegancia. Cada hora se están descubriendo nuevas formas de utilizar los puentes de información que enlazan los ordenadores. Nuestro entusiasmo por incorporar sobrios puentes electrónicos a cada una de las aplicaciones concebibles no debería empañar una razonable atención al problema de si tales puentes serán capaces o no de soportar el tráfico de información consiguiente. Estamos convencidos de que los sistemas distribuidos robustos proporcionan un instrumento valioso para conectar ordenadores de manera rápida y fiable, y van a crear oportunidades para el ocio y el negocio en la sociedad de la información. Pero también estamos convencidos de que, en muchos casos, a menos que se pueda articular un sistema distribuido capaz de funcionamiento robusto, quizá sea mejor no construir —ni utilizar— ninguno.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FAULT TOLERANCE IN TANDEM COMPUTER SYSTEMS. Jim Gray, Joel Bartlett y Robert W. Horst en *The Evolution of Fault-Tolerant Computing*. Recopilación de A. Avizienis, H. Kopetz y J. C. Laprie. Springer-Verlag, 1987.

FATAL DEFECT: CHASING KILLER COMPUTER BUGS. Ivars Peterson. Random House, 1995.

GROUP COMMUNICATION. Sección especial en *Communications of the ACM*, vol. 39, n.º 4, págs. 50-97; abril de 1996.

Bases neurológicas de la adicción a la cocaína

El consumo de cocaína induce alteraciones bioquímicas y celulares en el cerebro que explican los efectos de la droga y los mecanismos por los que el alcaloide produce dependencia

Luigi Pulvirenti y George F. Koob

El consumo ilegal de drogas psicoestimulantes, cocaína en particular, ha adquirido en los últimos años proporciones epidémicas. El creciente interés científico por los aspectos médicos, neuroquímicos y sociales de dicho fenómeno se ha traducido en una serie de trabajos de investigación centrados en las bases nerviosas y químicas del abuso de la cocaína. Merced a tales estudios comprendemos ahora mejor los procesos moleculares responsables de la dependencia y de los efectos euforizantes de tales drogas.

Los pueblos andinos conocían el efecto de la cocaína hace, probablemente, más de 4500 años. Para combatir el hambre y el cansancio, masticaban hojas secas de *Erythroxylum coca*, a menudo junto con ceniza de otras plantas o cal, llegando a ingerir hasta 60 gramos al día, de los cuales el organismo absorbía entre 100 y 200 miligramos del principio activo principal, algo que hoy se tipificaría como abuso. Los incas atribuían a la droga un especial significado social, político y religioso; su consumo se consideraba privativo de la aristocracia y la casta sacerdotal. El acceso de otras personas era excepcional. Sin embargo, los conquistadores españoles se encontraron a su llegada con que el uso estaba extendido a una gran parte de la población. Aunque en un principio se prohibió el consumo, los españoles terminaron por potenciar su producción.

Albert Niemann trabajaba en 1860 en el laboratorio de Friedrich Wöhler (1800-1882), uno de los fundadores de la química orgánica, en Göttingen, y allí logró aislar a partir de hojas de coca una substancia cristalina, incolora y de sabor amargo que llamó cocaína (si bien es posible que fuera el farmacéutico Friedrich Gaedecke quien obtuviera el alcaloide ya en 1855). Se desarrollaron estudios sobre sus efectos en el hombre que dieron pie a informes entusiastas. Especial eco obtuvo en 1884 una publicación de Sigmund Freud (1856-1939), padre del psicoanálisis, que llevaba por título *Über Coca* ("Sobre la coca"), donde recomendaba su empleo en numerosas afecciones. El mismo la prescribió, con poco rigor. En ese mismo escrito, mencionaba su acción anestésica local sobre las mucosas. Gracias a su satisfactoria introducción en el campo de la medicina, en 1884 la cocaína se convirtió en el primer anestésico local de importancia en oftalmología quirúrgica.

El posterior descubrimiento de graves efectos secundarios a su abuso no fue óbice para que la cocaína deviniera la droga de moda entre las clases privilegiadas. Es significativa la aparición de productos que contenían pequeñas concentraciones de cocaína; así, la "Coca-Cola" y el Vin Mariani. (Sépase, sin embargo, que la fórmula de la "Coca-Cola" se alteró ya a finales del siglo pasado.) Pronto se promulgaron leyes que regulaban la introducción, tráfico y venta de cocaína, a la par que se hacían preceptivos su registro y la prescripción médica. La moda, que en los años veinte había calado en círculos artísticos e intelectuales, comenzaba a decaer.

A principios de los años sesenta, el cambio de mentalidad permitió que volviera a ganar popularidad. Una vez más se la consideró una droga lúdica, incapaz de crear síndrome de abstinencia o siquiera dependencia. El consumo adquirió en las décadas de los setenta y de los ochenta un desarrollo extensísimo, primero en Estados Unidos y luego en Europa.

De esa misma época data la aparición del *crack*: cocaína en forma de base libre. El clorhidrato de cocaína, la forma habitual, se administra por vía intranasal y, rara vez, intravenosa, mientras que el *crack* se fuma y alcanza en pocos segundos elevadas concentraciones en el sistema nervioso central, lo que explica su peligrosidad clínica.

En cuanto alcaloide, la cocaína tiene nitrógeno en su estructura molecular. Estimula el sistema nervioso autónomo simpático. Induce vasoconstricción, incrementa la presión arterial y acelera el pulso, a la par que aumenta la vigilancia, el estado de alerta y la capacidad de percepción y de reacción. Produce estimulación psicomotora del sistema nervioso central de forma parecida a como actúan las anfetaminas o la cafeína: el sujeto habla de disminución del apetito y ganas de dormir, se siente fuerte, seguro y pletórico de energía. Este incremento de las capacidades físicas y psíquicas explica por qué consumen psicoestimulantes las personas cuya ocupación diaria exige un elevado rendimiento.

La cocaína modula, asimismo, funciones cerebrales relacionadas con la esfera cognitivo-afectiva. Mejora el estado de ánimo y produce sensación de bienestar y euforia intensa. Los pensamientos y las palabras brotan en cascada (taquipsiquismo), si bien no siempre se conserva la coheren-

LUIGI PULVIRENTI y GEORGE F. KOOB coincidieron en el departamento de neurofarmacología que el segundo dirige en el Instituto de Investigación Scripps de La Jolla. Pulvirenti enseña psicofarmacología en el centro de neurobiología experimental "Mondino-Tor Vergata".

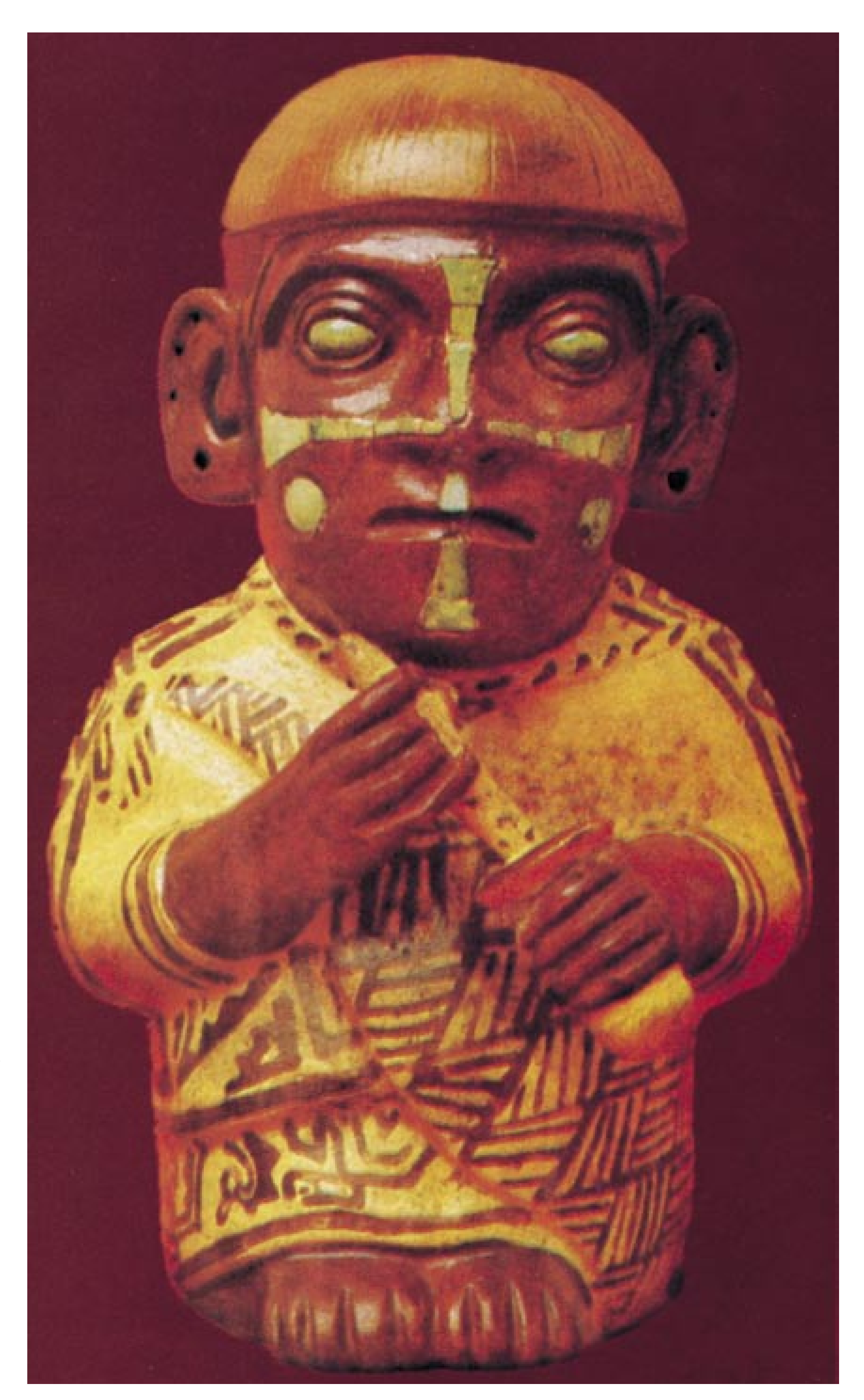
cia. En general, el individuo describe una sensación de sumo bienestar. El afán de volver a experimentarla les impulsa a tomar de nuevo la droga, pero con el abuso sus efectos se modificarán.

A diferencia de otras drogas de administración diaria, los adictos a la cocaína consumen grandes dosis en cortos períodos de tiempo y con carácter cíclico. Tras repetidos episodios de intoxicación, se manifiestan una serie de efectos indeseables: desde un estado de ansiedad e hiperirritabilidad hasta síndromes alucinatorios, un abanico general de síntomas que recuerdan la psicosis paranoide. Algunos cocainómanos se ven sorprendidos por ataques de pánico o por presentimientos de muerte inminente. Y siempre se experimenta una necesidad compulsiva de conseguir más droga.

A estas alteraciones de la conducta se suman complicaciones cardiocirculatorias, como infarto de miocardio e ictus, e incluso convulsiones potencialmente letales. En los intervalos entre dos episodios de consumo los adictos se hunden en depresiones y se tornan apáticos y somnolientos, además de experimentar la necesidad perentoria de obtener droga.

La caracterización de las alteraciones orgánicas producidas por la cocaína ha sido de importancia capital. Por una parte, ha refutado la teoría de que la dependencia tuviera origen exclusivamente psíquico, nunca orgánico. Desde ese planteamiento, para superarla bastaría una relajación adecuada complementada con estímulos adecuados. Por otra parte, el interés clínico del problema dio pie a una serie de investigaciones que han ayudado a esclarecer los procesos bioquímicos que tienen lugar en el cerebro y que son responsables del abuso de cocaína y muy probablemente de otras drogas.

En primer lugar se imponía desentrañar el mecanismo en virtud del cual la droga producía sus efectos euforizantes. Diversos experimentos en roedores realizados en los años cincuenta indicaron el camino correcto. Jim Odds y Peter Milner, entonces en la Universidad McGill de Montreal, implantaron electrodos en distintas regiones del cerebro de los animales, que podían autoestimularse gracias a un dispositivo colocado en el interior de la jaula. Cuando el roedor presionaba una palanca, se producía una pequeña descarga eléctrica, parecida a la emitida por la actividad de las células nerviosas (neuronas). Los experimentadores observaron que, si colocaban los electrodos en ciertas áreas, los animales no hacían prácticamente otra cosa que autoestimularse. Consideraron que el comportamiento descrito se debía a que la corriente eléctrica producía una sensación extremadamente placentera y postularon la existencia de uno o varios centros del placer en el cerebro, responsables fisiológicos de dichas sensaciones y que podían estimularse desde fuera del organismo. Más tarde, se propuso la hipótesis de que las drogas creaban sus efectos euforizantes mediante la activación de los centros del placer.



1. ESTA CERAMICA PERUANA de alrededor del 400 d. C. representa a una persona que extrae cal de una calabaza para mezclarla con hojas de coca y potenciar así el efecto de la cocaína. La foto fue realizada por Gerard Bertin.

Los animales de experimentación, ya sean ratones, ratas o chimpancés, presentan unas pautas de comportamiento respecto a los estupefacientes parecidas a las humanas. Se ha visto que, si se prepara un dispositivo que les permita autoadministrarse substancias por vía de un catéter venoso, a la larga se inyectan sólo aquellas que inducen abuso en el hombre: psicóticos, opiáceos y sedantes. Los resultados sugieren la existencia de un substrato cerebral, dotado de un mecanismo neuroquímico especializado, que responde de forma selectiva sólo a algunos fármacos y que no es exclusivo del hombre, lo cual es aún más interesante, si cabe. Parece que estas drogas producen en dichos mamíferos un estado de euforia y su apetencia es tal, que roedores y monos llegan a dedicarse exclusivamente a administrarse cocaína, anfetamina o heroína, descuidando otras actividades vitales como el comer o el beber.

Se alcanzó así un modelo experimental en animales que permitía el estudio sistemático en condiciones controladas de los procesos bioquímicos subyacentes bajo el fenómeno de la dependencia. Observaciones ulteriores reforzaron tal analogía con el hombre. En efecto, los animales de laboratorio a los que se les deja un acceso ilimitado a la droga, precisan dosis cada vez más altas (el organismo desarrolla tolerancia a la dosis habitual), se vuelven dependientes y padecen manifestaciones propias de la abstinencia. Incluso las propias pautas de administración —continua, episódica o masiva— se parecen notablemente para cada tipo de droga a las que vemos en el drogadicto. El desarrollo y el perfeccionamiento de este modelo animal ha abierto una vía de experimentación cuya importancia clínica se ignoraba 20 años atrás.

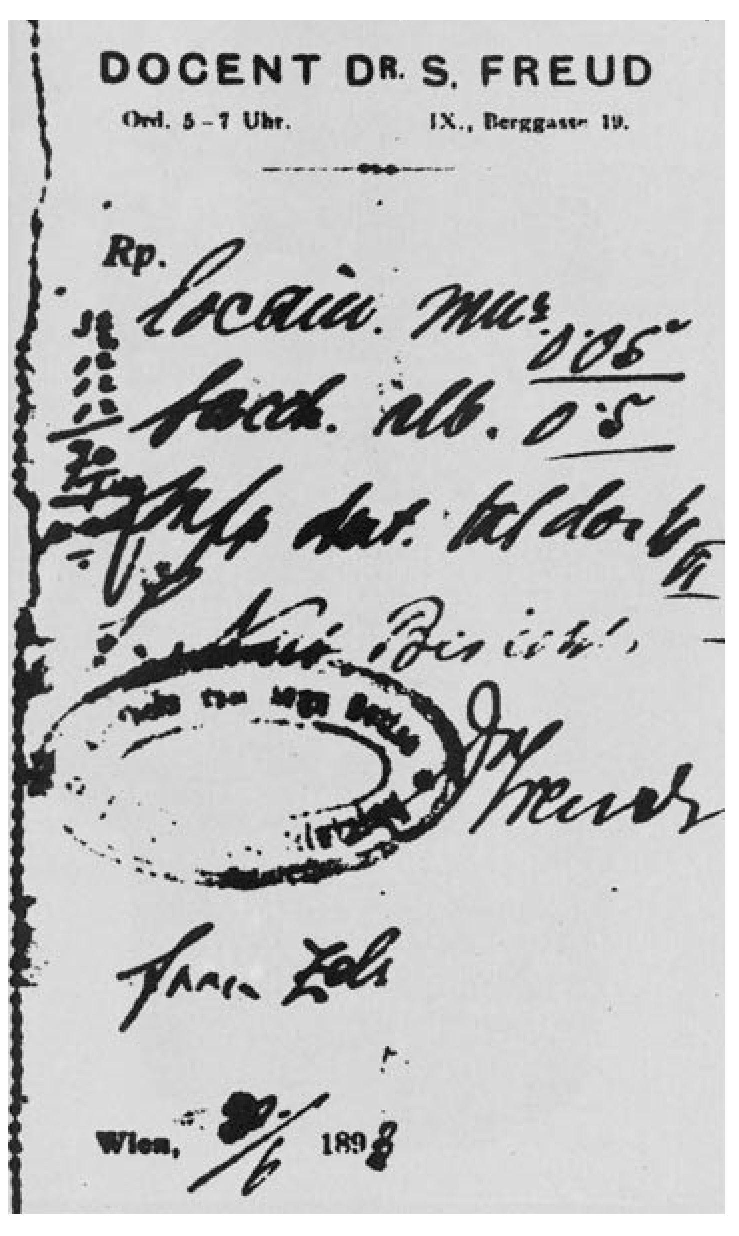
Se sabe, desde hace tiempo, que la cocaína actúa en la sinapsis, donde tiene lugar la propagación química de los impulsos nerviosos. A estos hiatos llega una señal eléctrica que induce la liberación por parte de la neurona presináptica de una molécula mensajera, o neurotransmisor. Esta molécula recorre en milésimas de segundo el mínimo espacio intersináptico para alcanzar la neurona postsináptica y unirse a receptores específicos. Sin embargo, la acción del neurotransmisor puede quedar bloqueada por degradación enzimática o por recaptura por la neurona presináptica.

La cocaína modula precisamente ese proceso: inhibe la recaptación presináptica de los neurotransmisores noradrenalina, dopamina y serotonina, prolongando así su actividad. El aumento de la presión arterial y de la vigilancia se debe a la mayor duración del efecto de la noradrenalina sobre la musculatura de los vasos y el tronco encefálico, respectivamente. Las alteraciones de la conducta y la personalidad, por contra, obedecen a cambios inducidos por la droga en la neurotransmisión dopaminérgica.

Se han podido desentrañar las estructuras cerebrales sobre las cuales actúa la cocaína, gracias a una serie de experimentos en que los animales de laboratorio se administraban la droga por vía intravenosa al ejercer presión sobre una palanca. Si los cobayas disponían de una cantidad diaria controlada de droga sólo durante un tiempo limitado, regulaban su dosis de manera que se mantuviera constante. No fue posible reconocer fenómenos de tolerancia o dependencia. Si el experimentador aumentaba o recortaba la dosis administrada con cada inyección, los animales lo contrarrestaban reduciendo o incrementando la frecuencia con la que activaban la palanca. Se obtuvo así un sistema mensurable preciso en el que el comportamiento del animal se correlaciona con la calidad y la potencia de los efectos de la droga administrada.

Asimismo, se han podido cartografiar los centros cerebrales activados por la cocaína provocando microlesiones selectivas de áreas específicas del cerebro mediante electrocoagulación, o de forma incluso más específica a través de sustancias que destruyen sólo aquellas terminaciones nerviosas que porten un determinado neurotransmisor. Si por cualquiera de estos procedimientos quedaran comprometidas las estructuras sobre las que actúa la cocaína para producir sus efectos euforizantes, los animales deberían perder el interés por procurarse la droga.

Las investigaciones se han ceñido al sistema límbico, un circuito ce-

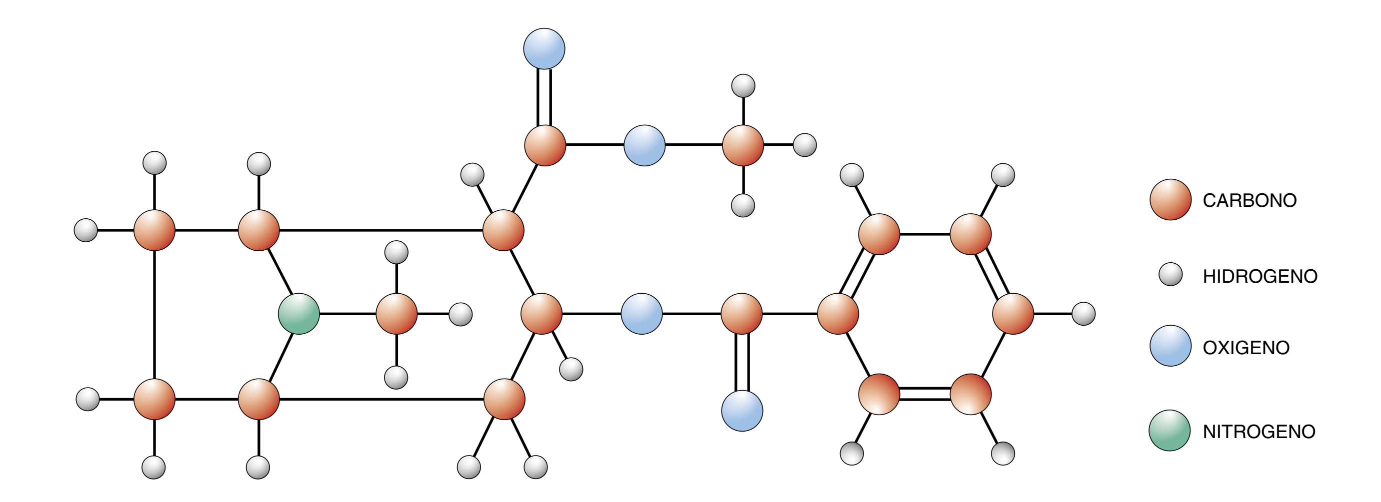

DOCENT DR. S. FREUD

Ord. 5–7 Uhr.   IX., Berggasse 19.

Rp.

Wien, 189

2. SIGMUND FREUD, fundador del psicoanálisis, recomendó la cocaína para una gama muy amplia de patologías. Aquí tenemos una receta suya que data de 1893.



3. LA COCAINA ES EL PRINCIPAL ALCALOIDE presente en las hojas del arbusto de coca (*Erythroxylum coca*) que se cultiva en regiones montañosas de Sudamérica y en Java. Este compuesto nitrogenado fue el primer anestésico local aplicado tópicamente y sirvió de modelo estructural para la síntesis de otros que no producen dependencia.

rebral formado por una serie de núcleos (microagrupaciones de neuronas de morfología y actividad bioquímica parecidas) que se encuentran en la parte anterior del cerebro y están conectados entre sí por fibras nerviosas. La función de tales núcleos se relaciona con las emociones, el ánimo y las motivaciones. Es probable que los núcleos formen parte del centro del placer. La dopamina es el neurotransmisor principal en algunos de ellos y parece que ejerce un papel destacado en los procesos relacionados con la motivación, como indica el hecho de que animales y hombres caigan en un estado de apatía tras la administración de una substancia que compita con la dopamina por los receptores.

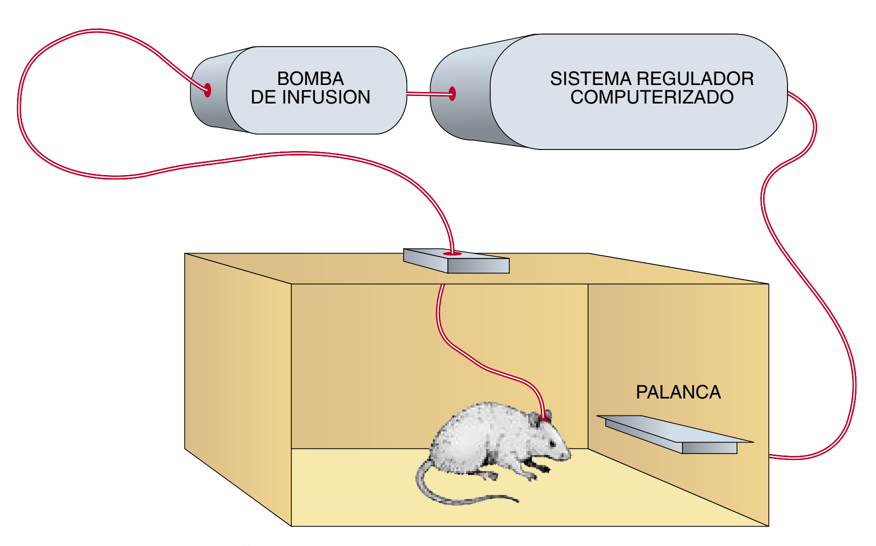
En los años ochenta se comprobó la validez de la hipótesis que atribuía al sistema límbico una intervención decisiva en la acción gratificante de la cocaína. Si se destruye el *nucleus accumbens septi* o, de forma más selectiva, se dañan con una toxina específica (6-hidroxidopamina) las terminaciones dopaminérgicas, el cobaya pierde interés por la droga.

Efectos similares se producen al lesionar las terminaciones nerviosas del complejo de la amígdala, otra de las estructuras clave del sistema límbico. En el estado de euforia provocado por la cocaína parece hallarse también implicada la corteza prefrontal, la región más anterior de la corteza cerebral, que también contiene dopamina y está conectada con otras regiones del sistema límbico (sin que se le considere siempre parte integrante del mismo). Pero si las lesiones se localizan en estructuras dopaminérgicas que no formen parte de este sistema, como el núcleo estriado, las ratas continúan administrándose la droga igual que antes.

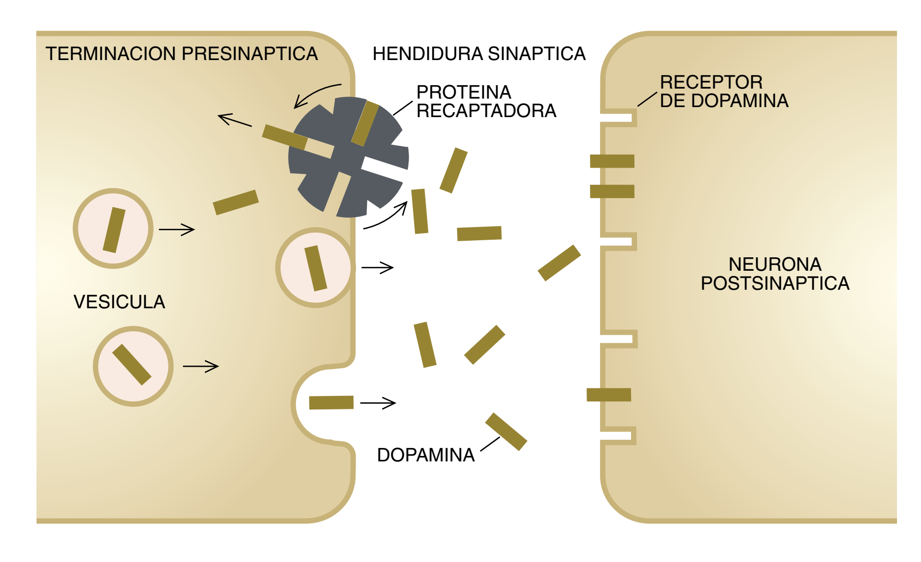
Los experimentos realizados en ratas en los que se midió la concentración del neurotransmisor en el cerebro tras la administración de la droga han demostrado la estimulación dopaminérgica del *nucleus accumbens septi*. A tal efecto, se implanta en el núcleo una microcánula dialítica y se irriga con una solución fisiológica durante cierto tiempo, al objeto de que las substancias que se hallan en la zona cerebral alcancen el equilibrio, en las mismas concentraciones, dentro y fuera de la fibra dialítica. En este caso se trataba de medir la absorción de droga por los cobayas y la liberación de dopamina.

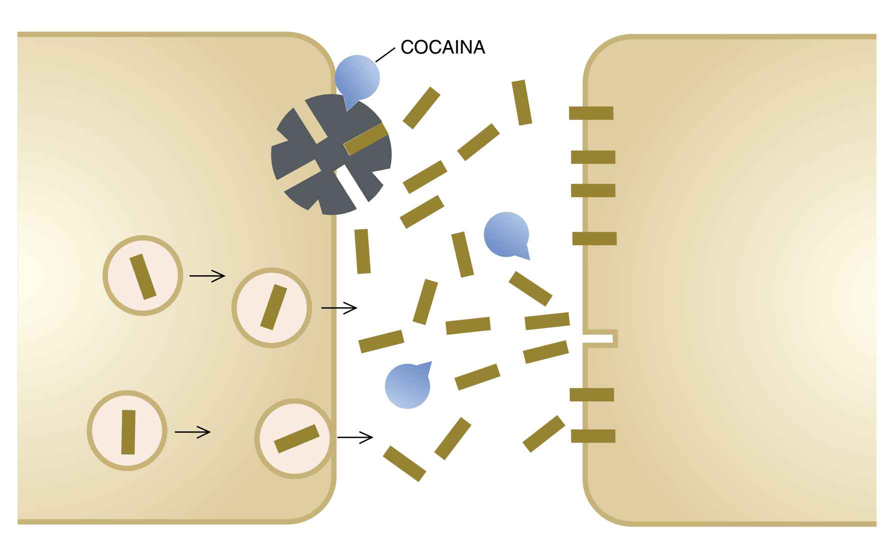
Como se esperaba, tras la inyección de la droga se produjo en el *nucleus accumbens septi* una liberación masiva de dopamina. Cuando su concentración regresó a niveles basales, los animales procedieron a autoadministrarse de nuevo. Estos resultados revisten un interés notabilísimo por cuanto vinculan la concentración de una molécula en el cerebro con una conducta compleja, la búsqueda compulsiva de droga; algo así se observa en el hombre.

No es posible una comprobación directa en el hombre porque no se dis-



4. CON ESTE DISEÑO EXPERIMENTAL se puede estudiar la acción de las drogas sobre el cerebro, así como las motivaciones que inducen el consumo reiterado y llevan a la dependencia. La rata está conectada a un sistema de infusión y puede autoadministrarse la droga por vía intravenosa ejerciendo presión sobre la palanca. Si tienen acceso ilimitado a la cocaína, ratones, ratas y monos se dedican únicamente a administrarse la droga, descuidando actividades fisiológicas que también son gratificantes como comer, beber o aparearse.





5. LA COCAINA produce su efecto en las sinapsis, donde la dopamina interviene como neurotransmisor. El alcaloide inhibe la recaptación presináptica del neurotransmisor liberado por las vesículas sinápticas y potencia su acción. Esta es la base de un gran número de alteraciones del comportamiento relacionadas con el consumo de la droga.

pone de métodos inocuos para medir la concentración del neurotransmisor. Las investigaciones realizadas con tomografía de emisión de positrones facilitan la observación indirecta de la actividad nerviosa, si bien su baja resolución no permite el análisis de la actividad de las distintas estructuras cerebrales estimuladas por la droga y, mucho menos, la determinación de las concentraciones de los neurotransmisores. Sí se puede afirmar que en estudios preliminares se ha comprobado que las regiones de activación más intensa corresponden al sistema límbico.

Como ya se ha visto, la cocaína y otras drogas psicóticas (la anfetamina, por ejemplo) producen en intoxicaciones episódicas una corta sensación de euforia. Mas la reiteración y el abuso inducen la aparición de otros efectos: desde agitación a psicosis de tipo esquizofrénico. También aquí la dopamina desempeña un importante papel.

Las células nerviosas se adaptan de forma flexible a las variaciones de su medio bioquímico. Esta plasticidad de las neuronas se traduce en una mayor o menor concentración de un receptor (nivel molecular) y en un aumento de las ramificación de sus prolongaciones para establecer más conexiones (nivel celular).

En relación con la plasticidad, las modificaciones en la propagación de la señal por la dopamina que experimentan algunas estructuras cerebrales se suceden como sigue: el consumo habitual produce la estimulación repetida de las sinapsis que se adaptan incrementando su efecto (la misma señal produce un mayor efecto). Esto se conoce como sensibilización o tolerancia inversa. Así, el progresivo e inevitable descenso de la actividad euforizante se acompaña del aumento paradójico de otras acciones debidas a la droga.

La traducción funcional del proceso de sensibilización consiste en un incremento patológico de la actividad dopaminérgica. Desde un punto de vista bioquímico, este fenómeno se puede explicar en términos de un aumento de la liberación de neurotransmisor, una mayor sensibilidad de los receptores de las neuronas postsinápticas y una más eficiente transmisión de la señal al interior de la neurona postsináptica.

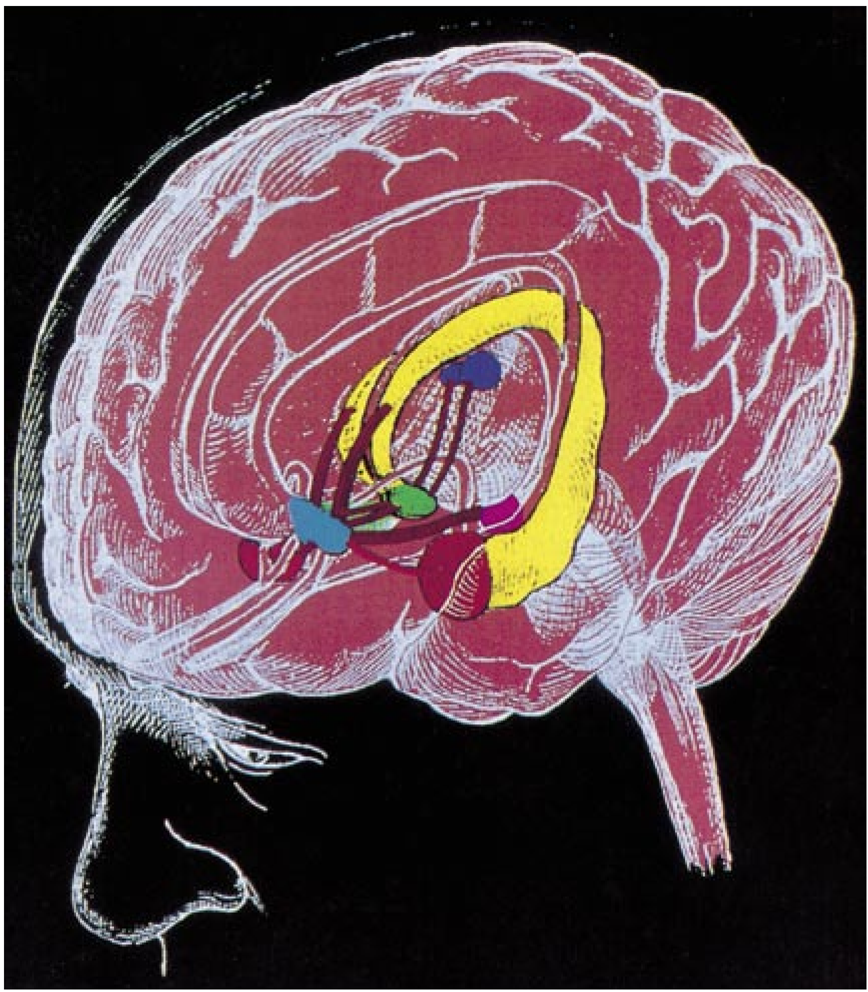
La sensibilización, fenómeno también observable en el uso prolongado de las anfetaminas, parece ser la responsable de las alteraciones del ánimo que derivan del consumo repetido de cocaína, como inquietud, exacerbación de la susceptibilidad, demencia paranoide y alucinaciones. Así, se ha podido comprobar en animales de laboratorio, a los que se les administraron sustancias psicoestimulantes durante un largo período de tiempo, un aumento de la transmisión de la señal dopaminérgica. En el hombre, los fármacos que inhiben la acción de la dopamina se prescriben en el tratamiento de las demencias y las alucinaciones.

Un último aspecto a describir en la adicción son las molestias que aparecen al interrumpir el consumo de la droga, el síndrome de abstinencia. El abuso epidémico de la cocaína y del *crack* ha permitido la caracterización de síntomas propios de un síndrome de abstinencia, en contraposición a lo que se defendía en los años sesenta. Estos síntomas se manifiestan hasta muchas semanas después de dejar de consumir la droga y aparecen en forma de cansancio, depresión, intento de suicidio, incapacidad de experimentar placer (anhedonía), sueño y compulsión apremiante de obtener droga.

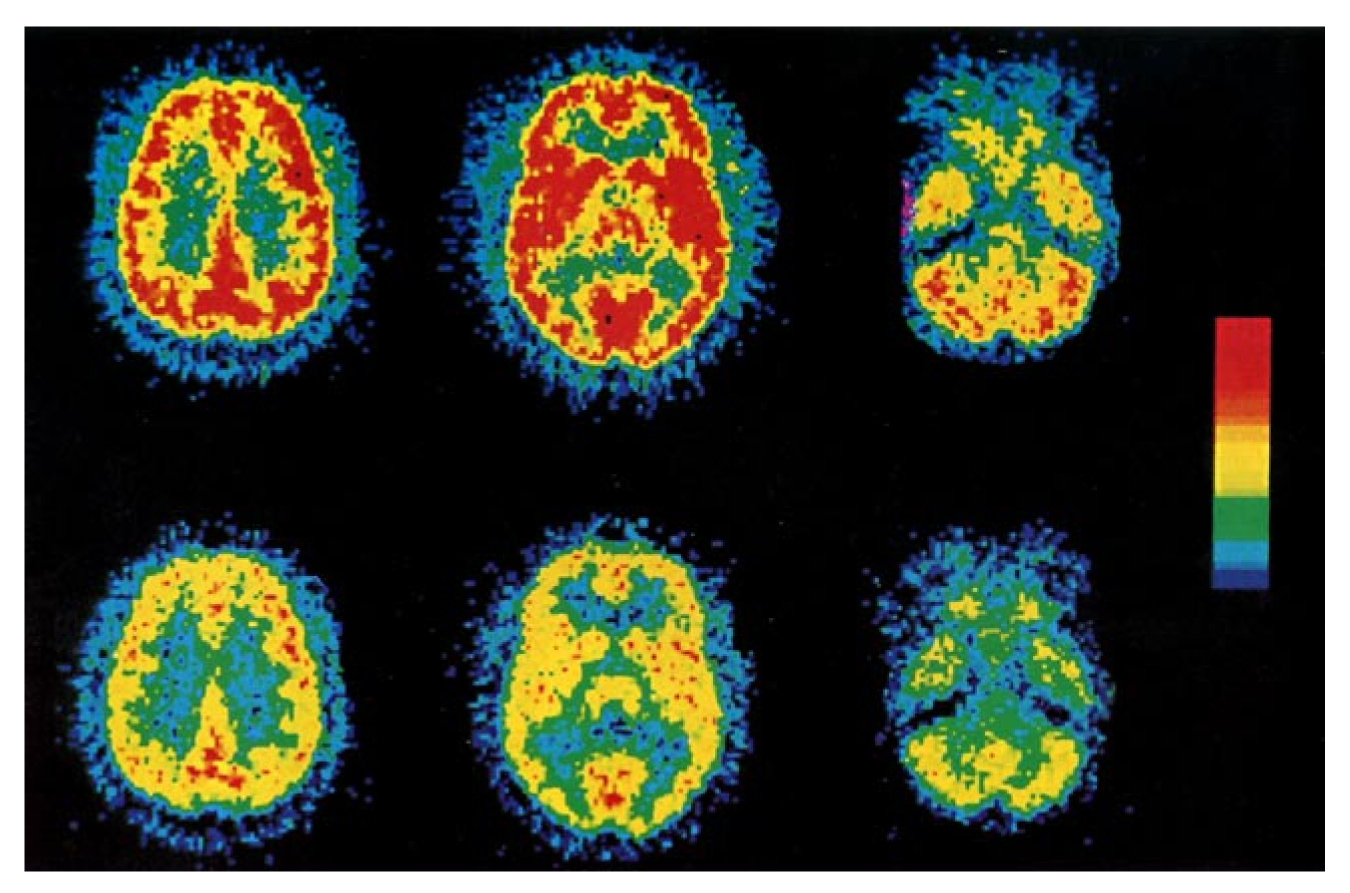
Este último fenómeno es especialmente acusado en la dependencia de la cocaína, más incluso que en otros estupefacientes, y se considera una de las principales causas de recaída. No se dispone de fármacos para combatirlo; por ello es tan importante, de cara a la prevención, conocer las bases bioquímicas del síndrome de abstinencia.

También aquí la dopamina desempeña un papel principal. Según parece, la repetida estimulación de

HIPOCAMPO
CAUDATO-PUTAMEN
CORTEZA CEREBRAL FRONTAL
SUBSTANCIA GRIS PERIACUEDUCTAL
TALAMO MEDIODORSAL
CEREBELO
COMISURA ANTERIOR
AREA VENTROTEGMENTAL
LOCUS COERULEUS
SUBSTANTIA NIGRA
NUCLEUS ACCUMBENS SEPTI
NUCLEO PALIDO VENTRAL
HIPOCAMPO LATERAL (ASTA DE AMMON)
COMPLEJO DE LA AMIGDALA



6. REPRESENTACION esquemática de las estructuras nerviosas pertenecientes al circuito formado por tegmento ventral, *nucleus accumbens septi*, núcleo pálido, tálamo y corteza en un cerebro de rata (*arriba: corte sagital*). Este circuito forma parte del sistema límbico y parece ser responsable de la necesidad compulsiva de procurarse droga que aparece en la dependencia. En rojo, las proyecciones mesolímbicas liberadoras de dopamina. La ilustración de la derecha muestra las correspondientes estructuras en el cerebro humano: la amígdala, en rojo; el hipocampo, en amarillo; la porción inferior de la calota peduncular, en morado; el *nucleus accumbens septi*, en azul; el núcleo pálido ventral, en verde, y el tálamo, en azul oscuro.



7. EL CONSUMO DE GLUCOSA desciende en ciertas regiones del cerebro tras la administración de cocaína, como se observa en estas tomografías de emisión de positrones en color. Fueron realizadas en el Instituto Nacional para el Abuso de Drogas norteamericano. En rojo, el consumo máximo y, por tanto, la actividad nerviosa más intensa.

la neurotransmisión dopaminérgica durante las fases de intoxicación cíclica acaba por agotar las terminaciones sinápticas. Se cree que reside ahí el origen de la anhedonía y de las manifestaciones depresivas. En animales que disponían de acceso ilimitado a la cocaína, posteriormente restringido, se observó un descenso de los niveles de dopamina del sistema límbico: en las mediciones microdialíticas se apreció una menor concentración del neurotransmisor en la cánula.

En los animales la abstinencia conduce a anhedonía, de tal forma que la autoestimulación a través de electrodos implantados en el centro del placer no resulta tan satisfactoria como antes. Se ha conseguido revertir ese estado con fármacos con la misma acción que la dopamina, hasta alcanzar el estado dopaminérgico fisiológico.

Dentro del sistema límbico, el *nucleus accumbens septi* y la amígdala son las estructura cerebrales decisivas para tres efectos derivados de la acción de la cocaína: la euforia, las alteraciones de la conducta propias del consumo excesivo y el síndrome de abstinencia. En todos ellos la dopamina es el neurotransmisor más directamente implicado.

El *nucleus accumbens septi* y la amígdala trabajan de forma sinérgica con otras estructuras del sistema nervioso central. La dopamina interacciona en el sistema límbico con otros neurotransmisores. Para hacernos, pues, una idea cabal de la base neurológica de la dependencia de la cocaína es preciso contemplar los circuitos límbicos como una unidad funcional.

El *nucleus accumbens septi* forma parte de un circuito nervioso que nace en el mesencéfalo, concretamente en el área ventrotegmental, cuyas neuronas proyectan sus prolongaciones hacia el *nucleus accumbens*. Este, a su vez, envía sus axones hacia el núcleo pálido ventral, una estructura de color amarillo pálido del mesencéfalo. Del núcleo pálido parten axones hacia el tálamo mediodorsal y la corteza prefrontal del cerebro. Tenemos así conformado el circuito en cuestión: área ventrotegmental-*nucleus accumbens*-núcleo pálido-tálamo-corteza. Este bucle nervioso recibe señales modulatorias procedentes del complejo de la amígdala y la formación hipocampal, compuesta por el hipocampo y la circunvolución dentada, entre otras estructuras.

La cocaína, al excitar las neuronas del *nucleus accumbens septi*, activa los circuitos límbicos responsables de las motivaciones fisiológicas que caracterizan el instinto de supervivencia, tales como la búsqueda de alimento o de pareja, necesarias para la continuidad de la especie. (Un nivel sanguíneo de glucosa bajo despierta la urgencia de procurarse alimento; la ingesta de hidratos de carbono la extingue.)

Dos importantes criterios caracterizan la dependencia: ese apremio compulsivo de procurarse la droga, ya mencionado, unido a una pérdida del control sobre el consumo (aunque el individuo quiera interrumpir su adicción, ya no le es posible), y el síndrome de abstinencia, del que forman parte alteraciones de las motivaciones y malestar general. Según las primeras hipótesis, al abandonar la droga aparecerían alteraciones compensatorias que modularían la respuesta primaria molecular y celular, base de la actividad euforizante. Este tipo de adaptación sería responsable de

la aparición del síndrome de abstinencia y podría darse en el mismo sistema de neurotransmisión, probablemente en el de dopamina. A este proceso se le denomina *adaptación intrasistema*.

Hemos podido demostrar bioquímicamente que una potenciación de la transmisión de la señal dopaminérgica se asocia a una acción gratificante de intensidad decreciente, mientras que el descenso del nivel de dopamina en la sinapsis se manifiesta en síndrome de abstinencia. Cabe destacar que las variaciones en la transmisión de la señal, aunque significativas, no son cuantitativamente importantes, limitándose a un 50 por ciento del nivel basal. Se cree que la cocaína puede actuar también sobre otro sistema de neurotransmisores dentro del mismo grupo de circuitos. La actividad de este sistema, suprimida en presencia de la droga, podría poner en marcha ciertos mecanismos celulares y moleculares que interaccionasen con la transmisión dopaminérgica. Este tipo de *adaptación entre distintos sistemas* podría explicar la falta de motivación que no es atribuible al solo efecto de la dopamina.

En condiciones normales el *nucleus accumbens septi* actúa de filtro modulador de las señales recibidas de otras estructuras del sistema límbico, en un proceso en el que se generan los estímulos biológicos necesarios para la supervivencia. Estas señales hallan en la dopamina la interfaz funcional capaz de traducir la motivación en acciones motoras. Se desconoce el mecanismo en virtud del cual la activación de tal sistema puede producir lo que nosotros experimentamos como recompensa o placer. Ni que decir tiene que la facilitación de los mecanismos motivacionales y motores dependientes de la dopamina puede constituir un aspecto del proceso neurobiológico por el cual los incentivos primarios participan en el proceso de gratificación y en el de refuerzo de la acción.

Una consecuencia lógica de esta hipótesis es que el sistema límbico dopaminérgico puede constituir el substrato neurológico de la activación psicomotora específica que aparece con la esperanza de estímulos gratificantes. Las primeras investigaciones bioquímicas han demostrado que cuando un animal de laboratorio espera alimento, droga o pareja sexual, se produce un aumento de la liberación de dopamina. Si, por el contrario, se inhibe la neurotransmisión dopaminérgica, el comportamiento ante la ansiada recompensa decae.

Por ello, es probable que las drogas psicóticas que activan el sistema dopaminérgico mesolímbico faciliten los procesos a través de los cuales los estímulos inducidos adquieren un sentido motivacional. Lo mismo que probablemente otras drogas, la cocaína activa el circuito mesencéfalo-*nucleus accumbens septi*-pálido-tálamo-corteza y usurpa la función integrada (generación de pautas de comportamiento motivacionales necesarias para la supervivencia), encauzando las energías del organismo hacia la búsqueda de droga y de estímulos gratificantes naturales y fisiológicos.

Será tarea de los próximos años comprobar si los sistemas límbicos que involucran el *nucleus accumbens septi* y la dopamina se hallan vinculados también con la dependencia de otras drogas como el alcohol, los opiáceos o la nicotina. Se debe asimismo aclarar de qué manera la disfunción de este sistema, producida por un consumo incontrolado de la droga, está relacionada con enfermedades mentales y alteraciones del estado de ánimo (depresiones o psicosis). Es necesaria una profundización en las investigaciones experimentales sobre la operación normal del sistema límbico. Así se podrá finalmente explicar con mayor exactitud cómo las distintas estructuras, de tan heterogénea apariencia, se integran en la compleja función del centro del placer y de qué forma se relacionan los procesos bioquímicos responsables de la gratificación con los afectos y emociones de la persona.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CELLULAR AND MOLECULAR MECHANISMS OF DRUG DEPENDENCE. G. F. Koob y F. E. Bloom en *Science*, vol. 242, págs. 715-723, 4 de noviembre de 1988.

COCAINA OGGI: EFFETTI SULL'UOMO E SULLA SOCIETÀ. Dirigido por F. Bruno, United Nations Interregional Crime and Justice Research Institute (UNICRI), UNICRI Publication, n.º 44, Roma, 1991.

COCAINE: SCIENTIFIC AND SOCIAL DIMENSIONS. Ciba Foundation Symposium 166, 1992.

COCAINA E CRACK: USI, ABUSI E COSTUMI. G. Arnao, Feltrinelli, Milán, 1993.

COCAINA 1994. VV.AA., en *Medicina delle farmacotossicodipendenze*, Italian Journal of the addictions, 2, págs. 20-54, febrero, 1994.

Estadísticas fraccionarias y topología

La estadística fraccionaria y las teorías cuánticas topológicas, aunque surgidas desde perspectivas diferentes, son dos campos de investigación interrelacionados

Jorge F. Gamboa, José L. Cortés y Luis F. Velázquez

La mecánica cuántica se introdujo a mediados de los años veinte para explicar la dinámica de las partículas subatómicas, tras comprobarse que, a pequeñas distancias, la naturaleza no se comportaba de la misma manera que en nuestra vida diaria.

El cuerpo teórico que empezó a configurarse, fundado en la dualidad corpúsculo-ondulatoria de los componentes elementales, halló respaldo en diversos experimentos. El más conocido quizá sea el de las rendijas. Consideremos una fuente emisora de partículas y una pantalla. Si colocamos una rendija doble entre la fuente y la pantalla, podría esperarse que los electrones atravesaran cada rendija siguiendo una trayectoria determinada, incidiendo en un par de franjas localizadas de la pantalla. Pero no es eso lo que se observa en la pantalla, sino un diagrama de difracción, que se asemeja a las ondas formadas en un estanque cuando lanzamos sobre el mismo una piedra. Los electrones se comportan como ondas. En este experimento de lo que ocurre a nivel microscópico, el concepto newtoniano de trayectoria y, por consiguiente, de velocidad y aceleración pierden su validez.

JORGE F. GAMBOA, JOSE L. CORTES y LUIS F. VELAZQUEZ coincidieron en la Universidad de Zaragoza investigando en cuestiones relativas al artículo aquí desarrollado. En la facultad de físicas de esa universidad enseña Cortés y se doctoró Velázquez, procedente de Granada. Gamboa, becario de la Fundación Alexander von Humboldt en la Universidad de Siegen, es profesor de la Universidad de Santiago de Chile.

La interpretación cuántica de los resultados establece que, por principio, no podemos determinar la trayectoria que sigue el electrón cuando sale de la fuente y llega a la pantalla. Cuando el experimentador realiza el proceso de medición, necesariamente introduce una perturbación incontrolable y, por consiguiente, sólo podemos asignar una probabilidad de que el electrón esté en uno u otro sitio. Siguiendo la interpretación clásica de la mecánica cuántica, la llamada interpretación de Copenhague, el electrón tendrá asociada una función de onda, $\psi(x)$, que determinará la probabilidad de que pueda hallarse en cada punto x del espacio.

La cantidad $\psi(x)$ se denomina amplitud de probabilidad. Se admite que pueda ser un número complejo, y, entonces, es la cantidad positiva $|\psi(x)|^2$ la que debe interpretarse como probabilidad (o mejor dicho, densidad de probabilidad) de encontrar al electrón en el punto x. De la misma forma que los objetos de nuestro entorno cotidiano evolucionan con el tiempo cambiando de posición, los electrones del mundo microscópico evolucionarán cambiando la probabilidad de hallarse en cada punto del espacio x. La situación en cada instante de un objeto macroscópico viene determinada por las leyes de Newton; para el electrón, la ley de evolución nos dice que su función de onda debe depender del tiempo t, de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, cuyo nombre hace honor al físico austriaco que la descubrió.

La ecuación de Schrödinger encierra la dinámica cuántica de un electrón y explica resultados experimentales bien establecidos. Entre ellos, la cuantificación de los niveles de energía en un átomo: la energía de un electrón en un átomo sólo puede tomar valores discretos. Así, la radiación que emite un átomo cuando un electrón disminuye su energía no puede ser arbitraria, sino que da lugar a las líneas de emisión predichas por la ecuación.

En el experimento de la doble rendija, podemos asignar una amplitud de probabilidad a cada camino que puede seguir un electrón. Para cada punto de la pantalla tendremos dos caminos posibles y, por tanto, dos amplitudes. De acuerdo con la mecánica cuántica, para hallar la probabilidad de que ocurra un suceso que puede darse de dos formas distintas hemos de sumar las amplitudes para cada una de las posibilidades, lo que nos da la amplitud total del suceso.

Podemos generalizar a N rendijas el experimento de la doble. Al hacerlo, generalizaremos también el análisis involucrado. La generalización del experimento no es sólo académica, sino que está enraizada con otra formulación más reciente de la mecánica cuántica debida a Richard P. Feynman. Este partió del principio de mínima acción de la mecánica clásica, según el cual entre todos los caminos posibles para ir de un punto x_1 en el instante t_1 a otro punto x_2 en un instante posterior t_2, el único que corresponde al movimiento real es aquel que da el menor valor posible de la acción: esta magnitud mide esencialmente la diferencia entre la energía cinética y potencial desarrollada a lo largo del camino.

El enfoque que adopta Feynman es que, en analogía con el experimento de las N rendijas, se puede asociar a cada posible camino una amplitud de probabilidad. Si admitimos que las amplitudes pueden superponerse, la amplitud de probabilidad total será

la suma sobre todos los caminos de cierto factor de peso; dicho factor, dependiente de la acción del camino, fue introducido por Feynman.

En la ecuación de Schrödinger, o equivalentemente en la formulación de Feynman, se halla, en principio, toda la dinámica del electrón. Pero, ¿hay otras propiedades del electrón que no estén contenidas en la ecuación de Schrödinger? Sí. El espín no está contenido en la ecuación de Schrödinger. Llámase espín a la orientación de la rotación de una partícula con respecto a un campo magnético dado. El espín es una propiedad intrínseca del electrón; sin él no sería posible explicar el desdoblamiento de niveles de energía en un átomo, la formación de moléculas por enlace iónico y otros muchos fenómenos.

Entre 1920 y 1921 los físicos alemanes Otto Stern y Walter Gerlach idearon un experimento para demostrar la existencia del espín. El diseño del aparato precisa de una fuente emisora de electrones, una pantalla y, en medio, un campo magnético. De la fuente sale entonces un haz de electrones que cruza la región sometida al campo magnético. Se observa entonces que el haz de electrones original se separa en dos haces que se estrellan en la pantalla en dos puntos distintos.

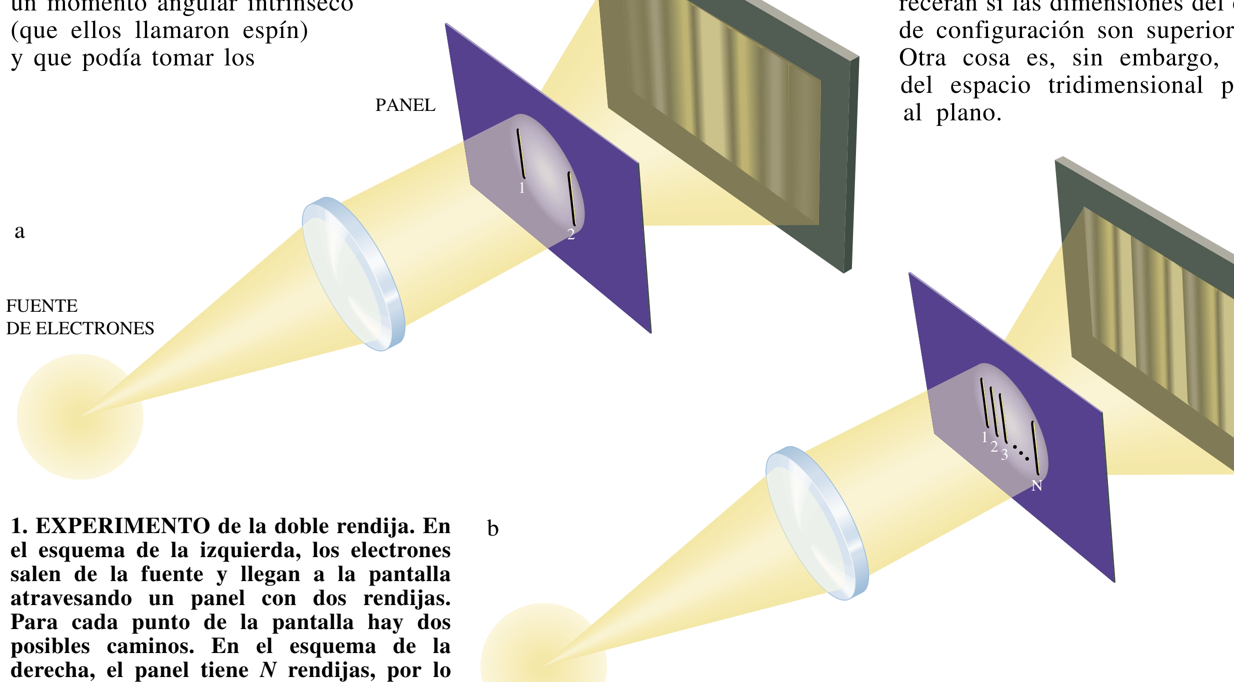
El experimento de Stern-Gerlach no recibió una explicación satisfactoria hasta 1925, cuando G. E. Uhlenbeck y S. Goudsmit propusieron que había que conceder al electrón un momento angular intrínseco (que ellos llamaron espín) y que podía tomar los valores 1/2 (espín arriba) o –1/2 (espín abajo). En el marco de esa hipotésis, el desdoblamiento del haz de electrones se debe a que, al pasar los electrones por la región de campo magnético, ganan o pierden energía según el espín esté orientado en el mismo sentido que el campo o en sentido opuesto. La hipótesis de Uhlenbeck y Goudsmit permitió explicar también el efecto Zeeman, descubierto mucho antes del nacimiento de la mecánica cuántica.

En mecánica cuántica, el espín guarda una relación estrecha con el comportamiento estadístico de un sistema de partículas. Fijémonos, por ejemplo, en un sistema formado por dos partículas idénticas. Supongamos que este sistema viene descrito por la función de onda $\psi(x_1, x_2)$, donde x_1 y x_2 son dos coordenadas que caracterizan no sólo la posición de la partícula 1 o 2, sino también su estado de espín. Si intercambiamos las partículas, al ser éstas idénticas, el sistema ha de permanecer en el mismo estado. Por tanto, la densidad de probabilidad total no puede haber cambiado y la función de onda tras el intercambio $\psi(x_2, x_1)$ sólo se puede diferenciar de la inicial $\psi(x_1, x_2)$ en un factor $e^{i\phi}$ de cambio de fase. Además, este cambio de fase no puede ser arbitrario: si volvemos a realizar el intercambio las partículas volverán a su situación original; por tanto, el resultado de dos intercambios consecutivos no puede alterar la función de onda. En consecuencia, ante el intercambio de partículas idénticas la función de onda sólo puede ser simétrica o antisimétrica.

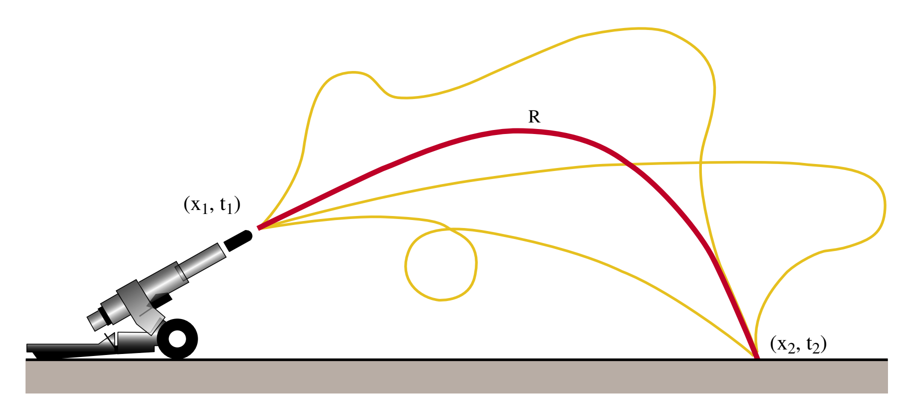
Pero, ¿qué relación guarda esta conclusión con el espín? La teoría cuántica de campos establece una conexión entre espín y estadística: las partículas con función de onda simétrica son necesariamente de espín entero (0, 1, 2, ...), mientras que las de función de onda antisimétrica han de tener espín semiimpar (1/2, 3/2, ...). Las primeras son los bosones y las segundas los fermiones.

El hecho de que los electrones sean fermiones constituye el fundamento del principio de exclusión de Pauli, en virtud del cual no puede haber dos electrones en el mismo estado. Si tuviéramos dos electrones en el mismo estado nada podría alterarse al intercambiarlos, lo que estaría en contradicción con el cambio de signo que ha de sufrir necesariamente la función de onda del sistema total. El principio de exclusión de Pauli no se da en los bosones, que pueden acumularse en el mismo estado y formar un condensado de Bose.

Hasta aquí, hemos supuesto que el espacio de configuración donde moran las partículas consta de tres dimensiones. Pero, ¿qué ocurre si las dimensiones del espacio de configuración cambian? ¿Aparecerán nuevos tipos de estadísticas o partículas con espín distinto de semientero? No aparecerán si las dimensiones del espacio de configuración son superiores a 3. Otra cosa es, sin embargo, cuando del espacio tridimensional pasamos al plano.



1. EXPERIMENTO de la doble rendija. En el esquema de la izquierda, los electrones salen de la fuente y llegan a la pantalla atravesando un panel con dos rendijas. Para cada punto de la pantalla hay dos posibles caminos. En el esquema de la derecha, el panel tiene *N* rendijas, por lo que para cada punto de la pantalla hay *N* caminos posibles.



2. UN EJEMPLO DEL PRINCIPIO DE MINIMA ACCION. Se ilustra la trayectoria real *R* (*en rojo*) seguida por un proyectil junto a otras trayectorias imaginarias (*en amarillo*) entre los mismos puntos e instantes iniciales (x_1 y t_1) y finales (x_2 y t_2); el principio de mínima acción nos asegura que la acción para la trayectoria real *R* será siempre menor que para cualquiera de las otras.

Consideremos dos partículas idénticas que se muevan en un plano. La función de onda del sistema será $\psi = \psi(x_1, x_2)$, pero ahora las coordenadas de las partículas x_1 y x_2 son bidimensionales. Si permutamos ambas partículas, la función de onda sólo puede cambiar en una fase, aunque ésta no tiene que ser necesariamente ±1. En tres dimensiones, el intercambio sólo podía alterar en un signo la función de onda; la razón de ello estribaba en que, al realizar dos veces consecutivas dicho intercambio, se arriba a una situación equivalente a la de partida. En dos dimensiones no ocurre así.

Si queremos dar cabida en dos dimensiones a partículas como el fermión tridimensional, hemos de evitar que las partículas se encuentren a la vez en la misma posición (es decir, en el mismo estado). Consideremos un intercambio de las dos partículas en el plano. Dibujemos la evolución temporal de este intercambio. Al realizarlo dos veces consecutivas, las partículas vuelven a la posición inicial. Ahora bien, este resultado no equivale a no haber realizado ninguna operación sobre ambas partículas. Por una razón: es imposible transformar la evolución bajo el doble intercambio en la evolución trivial en la que las partículas no se mueven. Para ello necesitaríamos que las trayectorias espaciotemporales de las dos partículas se cortaran, lo que significaría superponer ambas partículas en un mismo instante.

Si no podemos vincular ambas evoluciones, tampoco es necesario que coincidan sus resultados físicos. Admitido que la evolución trivial no altera la función de onda, nada nos permite inferir que la función de onda coincida, tras el doble intercambio, con la inicial. En otras palabras, en dos dimensiones el cuadrado de la fase de intercambio no ha de ser forzosamente 1; dicha fase de intercambio puede ser arbitraria.

Llegamos así a la conclusión de que en el plano la función de onda no tiene por qué ser simétrica o antisimétrica bajo intercambio de partículas idénticas. Eso significa que las partículas bidimensionales no quedan clasificadas en bosones y fermiones, sino que hay infinitos tipos de partículas, las denominadas genéricamente alones. Cada tipo de alón viene caracterizado por una fase $e^{i\phi}$. Esta fase determina la respuesta de los alones a un intercambio. Bosones y fermiones aparecen en este contexto como tipos particulares de alones que se obtienen respectivamente para $\phi = 0,\ 2\pi,\ 4\pi, ...$ y $\phi = 0,\ \pi,\ 3\pi, ...$

Aparecen así en el plano nuevos tipos de estadísticas cuánticas al considerar sistemas de muchos alones con un valor de ϕ que no sea un número entero de veces π. Estas nuevas estadísticas se denominan fraccionarias, debido precisamente a que el valor de ϕ que las caracteriza no está limitado a un múltiplo entero de π, sino que puede ser una fracción de π. Las partículas con estadística fraccionaria presentan un comportamiento intermedio entre el del fermión y el del bosón.

En los alones se generaliza la conexión entre espín y estadística conocida para bosones y fermiones. El espín del alón, relacionado con el parámetro estadístico ϕ, no está limitado a valores semienteros, sino que puede ser una fracción arbitraria o incluso un número cualquiera. Por esta razón se dice que los alones tienen espín fraccionario. Asimismo, los alones que no sean bosones ni fermiones cumplen el principio de exclusión de Pauli, porque esa regla se cumple siempre que un intercambio altera la función de onda, lo que sólo deja de ser válido en los bosones.

A diferencia de los fermiones, los bosones pueden presentar interacciones de contacto. ¿En qué consisten? En general, toda interacción entre partículas tiene un alcance, una distancia máxima a partir de la cual esa interacción es nula. Las interacciones de contacto presentan alcance nulo; no parece, pues, raro que se den para partículas como los bosones, que pueden superponerse (es decir, pueden estar a distancia nula), y no tengan ningún efecto sobre los fermiones, que cumplen el principio de exclusión.

Los alones que no son bosones obedecen el principio de exclusión. Sin embargo pueden también ser sensibles a las interacciones de contacto a la manera de los bosones, si por ésas entendemos el límite de interacciones con un alcance finito que tiende a cero. Vemos, pues, que las partículas con estadística fraccionaria presentan en algunos aspectos un comportamiento de fermiones y en otros un comportamiento de bosones.

Las estadísticas fraccionarias están ligadas a las teorías cuánticas topológicas. La topología es una rama de las matemáticas que estudia las nociones de proximidad y continuidad. Dos curvas que unen dos puntos se entiende que son próximas si podemos transformar una en otra mediante una pequeña deformación continua; es decir, sin cortarlas ni crear picos. Se llaman homotópicamente equivalentes dos curvas que se pueden conectar a través de una sucesión de tales deformaciones continuas; se denomina transformación de homotopía la deformación que las conecta.

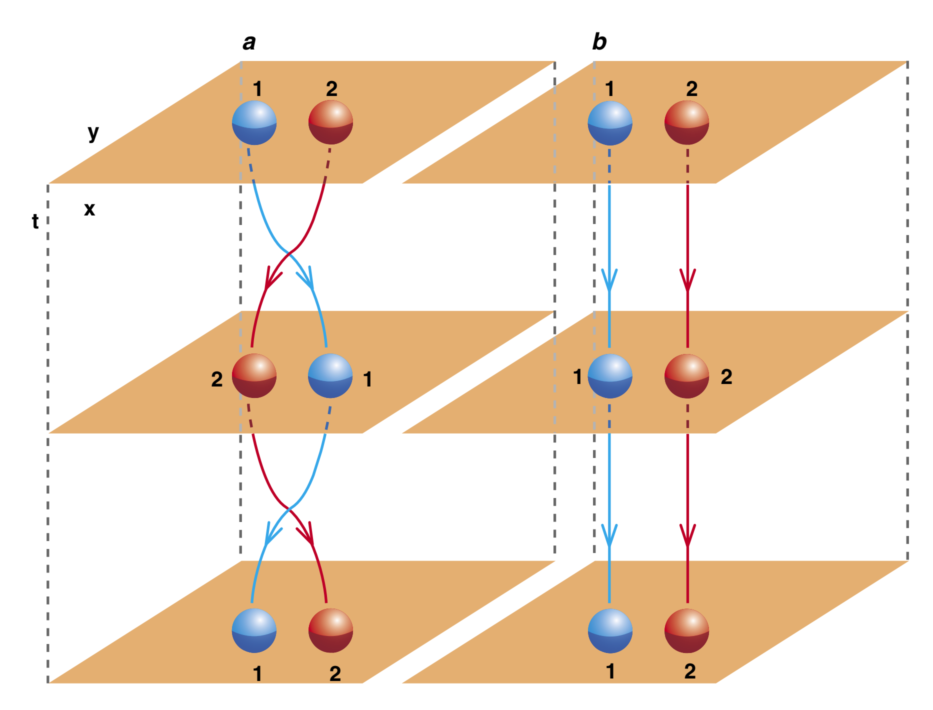
En el espacio tridimensional ordinario o en el plano podemos siempre deformar continuamente una curva entre dos puntos en otra. Cuando todas las curvas trazadas entre dos puntos determinados son homotópicamente equivalentes, hablamos de espacios y planos topológicamente triviales. Pero no siempre se da esa situación. Imaginémonos un plano al que le hemos abierto un hueco (lo que significa que las curvas no pueden pasar por ese agujero). Por simplicidad limitémonos al caso de curvas cerradas (con el mismo punto inicial y final) también llamadas lazos. Está claro que no podemos deformar continuamente un lazo que encierre en su interior al agujero en otro que lo deje fuera: para ello habría que

cruzar el hueco. En general, dos lazos cualesquiera serán homotópicamente equivalentes cuando den un mismo número de vueltas en torno al agujero y en el mismo sentido.

En un espacio topológicamente no trivial, los lazos se organizan en clases de homotopía, así denominadas porque cada clase está formada por los lazos que pueden deformarse continuamente unos en otros. En el ejemplo anterior, cada clase de homotopía está constituida por las curvas que dan un mismo número de vueltas n en torno al agujero, de forma que las podemos nombrar con dicho entero n. Esta misma clasificación en clases de homotopía se aplica a curvas entre dos puntos distintos (la cuestión es que a cada una de estas curvas se le puede asignar un lazo, de modo que se dice que la curva es de la clase n si lo es el correspondiente lazo).

Desde el punto de vista de la mecánica clásica, estas disquisiciones sobre un sistema de partículas no tienen ninguna implicación, por la razón obvia de que entre dos puntos dados sólo hay una trayectoria posible, que viene dada por las ecuaciones de Newton, o equivalentemente por el principio de mínima acción. Pero en mecánica cuántica la formulación de Feynman nos dice que no hay una trayectoria definida. Todos los caminos tienen alguna probabilidad y cada uno influye en el proceso de medición con un determinado peso. Por consiguiente, habremos de comparar entre sí caminos que pueden pertenecer a clases de homotopía distintas si el espacio es topológicamente no trivial. La mecánica cuántica podría, pues, ser sensible a las características topológicas del espacio de configuración.

En la mecánica cuántica reformulada por Feynman habría que preguntar por el factor de peso y la suma sobre caminos cuando el espacio de configuración es topológicamente no trivial. Consideremos de nuevo el ejemplo del plano con un agujero. Admitamos que el factor de peso que propuso Feynman mide el peso relativo entre curvas próximas. Que dos curvas sean homotópicamente equivalentes indica que pueden conectarse a través de una sucesión de curvas, cada una próxima a la siguiente. Esto nos permite decir que el peso relativo entre curvas homotópicamente equivalentes es también el factor de peso de Feynman.



3. DIAGRAMA ESPACIOTEMPORAL de dos partículas. En *a* se ofrece un doble intercambio en el plano. Las partículas 1 y 2 realizan el mismo intercambio dos veces consecutivas, para terminar en la posición inicial. Los ejes horizontales *x* e *y* denotan las coordenadas en el plano y el eje vertical *t* el tiempo transcurrido. En el diagrama *b*, análogo al anterior, las partículas no se mueven. Para transformar el diagrama *a* en el *b* las curvas espaciotemporales descritas por 1 y 2 deberían llegar a tocarse. Esto significaría tener simultáneamente a las dos partículas en el mismo punto del plano.

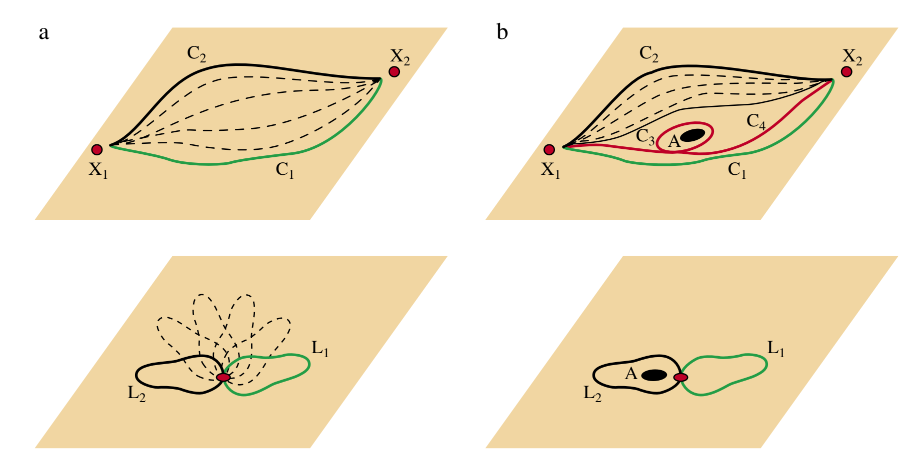
¿Qué ocurre si comparamos curvas de distintas clases de homotopía? En tal caso, no podremos conectarlas mediante una sucesión de curvas próximas, ni disponemos *a priori* de criterio alguno para relacionar los pesos. Se requiere que, además del factor de peso de Feynman, asignemos a cada clase n un factor χ_n que medirá el peso relativo de las distintas clases de homotopía. Ahora bien, los pesos χ_n de las clases en cuestión no pueden ser totalmente arbitrarios. Lo impiden dos principios fundamentales, uno relacionado con la amplitud y el otro con la conservación de la probabilidad.

La mecánica cuántica nos enseña cómo construir la amplitud de un proceso descomponiéndolo en otros más elementales. Explica que la amplitud de un proceso constituido por la composición de otros dos es el producto de las amplitudes de éstos. O lo que es lo mismo: podemos descomponer un camino cualquiera en tramos, sabiendo que el factor de peso del camino total será el producto de los pesos de cada uno de los tramos del camino que lo integran.

El factor de peso de Feynman cumple ya esta propiedad, pero hay que procurar que los nuevos factores χ_n añadidos también la satisfagan. Al unir dos curvas que den respectivamente n y m vueltas en torno al agujero obtendremos otra que dará $n+m$ vueltas en total. En otras palabras, la composición de una curva de la clase n y una de la clase m nos da otra de la clase $n+m$. Y, según la regla anterior, el producto de los pesos de las clases n y m dará el peso de la clase $n+m$.

Por lo que concierne a la conservación de la probabilidad, si sumamos las amplitudes de todos los posibles caminos a todos los puntos del espacio tendremos una probabilidad total 1 de encontrar la partícula. Esto comporta que los pesos χ_n sólo sean fases. Si además han de satisfacer la regla de composición anterior, estas fases serán $\chi_n = e^{i\varphi n}$.

Hay que tener en cuenta que todos los caminos posibles influirán en la suma, sea cual sea su clase de homotopía. Por tanto, al sumar caminos habrá que hacerlo primero con todos los de clase n y después sumar todas las posibles clases. En general, la suma de caminos requiere sumar las curvas de cada clase para sumar después todas las clases. Es en la suma de las distintas clases donde aparecen factores extraños debido a la indeterminación del peso relativo entre curvas no próximas.



4. EL PLANO COMO EJEMPLO DE ESPACIO TOPOLOGICAMENTE TRIVIAL. En la figura superior del diagrama (*a*) vemos dos curvas arbitrarias C_1 y C_2 entre dos puntos x_1 y x_2. Una curva puede deformarse en otra sin crear cortes ni picos: C_1 y C_2 son homotópicamente equivalentes. En la figura inferior se ilustra la misma situación, aunque para dos lazos arbitrarios L_1 y L_2. En el diagrama (*b*), se ofrece el plano con un agujero como ejemplo de espacio topológicamente no trivial; en la figura superior vemos que la presencia de un agujero *A* en el plano impide deformar continuamente la curva C_2 en la curva C_1 (al pasar por el agujero la curva C_2 sufriría un corte). La curva C_3 es un ejemplo de curva homotópicamente equivalente a C_2, mientras que la curva C_4 no es homotópicamente equivalente a C_1 ni a C_2. En la figura inferior se observa que los lazos L_1 y L_2 que antes eran homotópicamente equivalentes ahora no lo son debido a que sólo uno de ellos encierra al agujero *A*.

El ejemplo del plano con un agujero no es mero ejercicio académico. Volvamos a la fuente de electrones que lanza un haz plano de esas partículas contra una pantalla. Coloquemos entre la fuente y la pantalla un solenoide infinitamente largo (en la práctica, de longitud mucho mayor que la distancia entre la fuente y la pantalla) y perpendicular al haz de electrones. El conductor concentra todo el campo magnético en su interior, de modo que los electrones se moverán como si fueran libres, con la salvedad de que no pueden penetrar en el solenoide. Por tanto, lo que tenemos es, en esencia, la propagación de electrones en un plano con un agujero correspondiente a la intersección del plano con el solenoide.

Con un experimento de este tipo podemos comprobar si son ciertas nuestras disquisiciones acerca de la influencia de la topología en un sistema cuántico. Si fueran erróneas, deberíamos observar el mismo comportamiento de los electrones antes y después de colocar el solenoide, pues éste se limita a crear un agujero en el plano donde se mueven tales partículas. Pero lo que se ve en la pantalla al colocar el solenoide es un diagrama de difracción similar al que aparece en el experimento de las rendijas. Este notable resultado, predicho en 1959 por Yuri Aharonov y David Bohm (llamado por ello efecto Aharanov-Bohm), muestra la importancia de la topología en el comportamiento de sistemas microscópicos.

El solenoide debería ser, pues, el agente causal de los pesos relativos entre curvas de distintas clases. De hecho, el resultado predicho por Aharanov y Bohm incluía una relación exacta de proporcionalidad entre el parámetro φ y el flujo magnético del solenoide. Por ende, debería haber una relación precisa entre el patrón de difracción observado y el flujo magnético del solenoide; relación que se presenta y los experimentos han confirmado.

Pero, ¿qué tiene que ver la topología con la posibilidad de estadísticas fraccionarias? Recuperemos el sistema de dos partículas en el plano que nos sirvió para entender la estadística fraccionaria. Recordemos que ésta aparecía como una posibilidad exótica para el comportamiento del sistema al intercambiar ambas partículas: al encontrarnos en un plano la función de onda no tiene por qué cambiar en un signo cuando permutan las partículas, sino que puede adquirir una fase arbitraria. Para comprender la conexión entre ese fenómeno y la topología prestemos atención al movimiento de las dos partículas en el plano.

En vez de pensar en las trayectorias de las partículas, 1 y 2, según las vería un mismo observador, imaginemos dos escenarios; primero: la trayectoria de la partícula 1 respecto de un cierto observador; y, segundo: la trayectoria de la partícula 2 vista desde la partícula 1. Conocidas las trayectorias de ambos escenarios, podemos determinar en cada instante la situación de ambas partículas. Se trata de un procedimiento válido para describir el movimiento del sistema.

La trayectoria del primer caso podrá ser una curva arbitraria en el plano. Pero las partículas no pueden superponerse; por tanto, la trayectoria del segundo escenario descrita por 2 no podrá pasar por el origen, donde se encuentra la partícula 1. Vemos así que el movimiento total se puede descomponer en dos: uno (caso primero) que tiene lugar en el plano completo y topológicamente trivial; otro (caso segundo) que se da en un plano con un agujero en el origen, topológicamente no trivial. De ese modo podemos descubrir fácilmente que el espacio de configuración de dos partículas que se mueven en el plano sin superponerse es topológicamente no trivial. Más. Sabemos que los lazos de este espacio se clasifican según un entero *n* que mide el número de vueltas del caso segundo en torno al origen, es decir, *n* es el número de vueltas que da 2 en torno a 1.

Recordemos que los pesos de las curvas de clase *n* son $\chi_n = e^{i\varphi n}$ y pensemos en un intercambio simple de 1 y 2. Al realizarlo dos veces consecutivas, ambas partículas habrán vuelto a su posición inicial, lo que quiere decir que habrán descrito sendos lazos. El lazo formado en el primer caso y descrito por 1 tiene lugar en el plano completo, sin ulteriores consecuencias. Sin embargo, el lazo del segundo caso y descrito por 2 originará en la función de onda una fase $e^{i\varphi}$ ya que 2 da una vuelta completa en torno al agujero situado en 1. Ahora bien, si el doble intercambio da lugar a una fase $e^{i\varphi}$ es porque la fase de un intercambio simple es $e^{i\phi} = e^{i\varphi/2}$. De esta forma volvemos a obtener que la fase de intercambio en dos dimensiones es totalmente arbitraria, al serlo también el parámetro φ que define los pesos cuánticos.

La diferencia es que esta nueva forma de ver la estadística fraccionaria nos permite desentrañar su origen topológico: la fase de intercambio $e^{i\phi}$ (o mejor dicho, su cuadrado) proporciona los pesos relativos de las distintas clases de homotopía. La libertad que se tiene a la hora de escoger estos pesos cuánticos es la que proporciona

la riqueza excepcional de estadísticas en dos dimensiones.

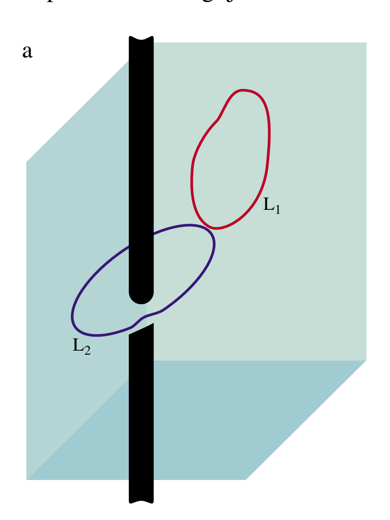
Entre otras cosas, este enfoque nos muestra algunas de las propiedades de las partículas con estadística fraccionaria; por ejemplo, la violación de la paridad e inversión temporal. Paridad es una transformación que intercambia derecha e izquierda (la imagen especular de un fenómeno), mientras que la inversión temporal consiste en recorrer el camino de vuelta. La presencia de estadística fraccionaria conlleva la violación de paridad e inversión temporal, pues cualquiera de estas transformaciones intercambia la orientación de las trayectorias de las partículas (esto es, el sentido en que se describen). Ambas operaciones intercambian así el sentido horario y antihorario cambiando el signo del número de vueltas n en los pesos de clase $\chi_n = e^{i\varphi n}$. Esto resulta equivalente a cambiar el signo de φ, lo que significa cambiar la fase de intercambio $e^{i\phi}$ por $e^{-i\phi}$. Por tanto la invariancia bajo paridad e inversión temporal sólo será posible si $e^{i\phi} = e^{-i\phi}$, cosa que sucede únicamente para bosones o fermiones.

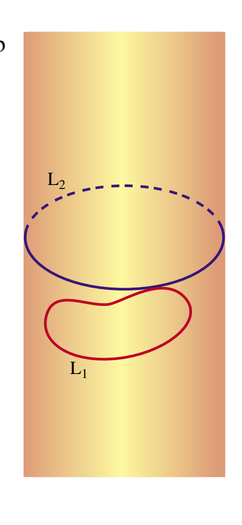
Esta nueva perspectiva nos permite además explicar la peculiaridad del plano. Generalicemos ese análisis para dos partículas en tres dimensiones. De nuevo la curva del caso segundo descrita por la partícula 2 respecto de la 1 tendrá lugar en un espacio con un agujero, tridimensional ahora. Pero esta diferencia es básica; en tres dimensiones, incluso convirtiendo un punto en un agujero, el espacio sigue siendo topológicamente trivial: podemos conectar continuamente dos lazos cualesquiera sin tocar el agujero (el espacio tridimensional necesitaría un agujero en forma de eje para convertirse en topológicamente no trivial). De aquí se sigue que todas las formas de realizar un doble intercambio caen en la misma clase de homotopía, luego tienen peso de clase trivialmente 1. El cuadrado de la fase de intercambio ha de ser entonces 1 y, por tanto, dicha fase sólo puede tomar los valores ±1.

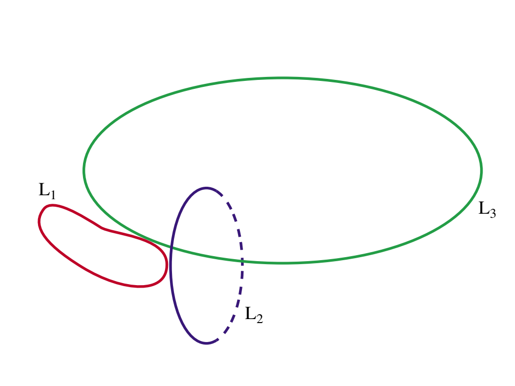
Este enfoque proporciona un método para construir partículas con estadística fraccionaria (alones) a partir de bosones y fermiones. La clave consiste en utilizar el efecto Aharanov-Bohm como mecanismo de transmutación estadística: si un solenoide genera en un sistema planar pesos de clase también generará fases de intercambio. Sea por caso un sistema planar de electrones, y adosemos a cada electrón el flujo magnético de un solenoide infinitamente largo y delgado. Si estos objetos compuestos se mueven dando vueltas unos respecto de otros tendrá lugar un efecto Aharonov-Bohm múltiple que generará fases en la función de onda del sistema. En consecuencia, dichos objetos tendrán una fase de intercambio no trivial. Los resultados de Aharanov y Bohm nos dan además la relación de proporcionalidad exacta entre ϕ y el flujo adosado a los electrones. En consecuencia, al ser vestidos con dicho flujo magnético, los electrones se han convertido en alones con una estadística fraccionaria. Es más, conocida la relación de Aharanov-Bohm podemos ajustar a nuestro antojo la estadística conseguida con sólo variar el flujo magnético.

Hemos llegado a los alones y la estadística fraccionaria a través de una serie de lucubraciones acerca de la mecánica cuántica en un hipotético mundo bidimensional. ¿Qué aplicación tienen en nuestro mundo tridimensional? Hasta comienzos de los ochenta, cuando los alones fueron redescubiertos por Frank Wilczek, las partículas con espín y estadística fraccionarios estaban confinadas en el terreno de lo exclusivamente hipotético. Pero por entonces se descubrió también el efecto Hall cuántico fraccionario y los alones se convirtieron en centro de atención. Algunos físicos vinculan los alones con el efecto Hall cuántico porque se trata de un fenómeno esencialmente bidimensional.

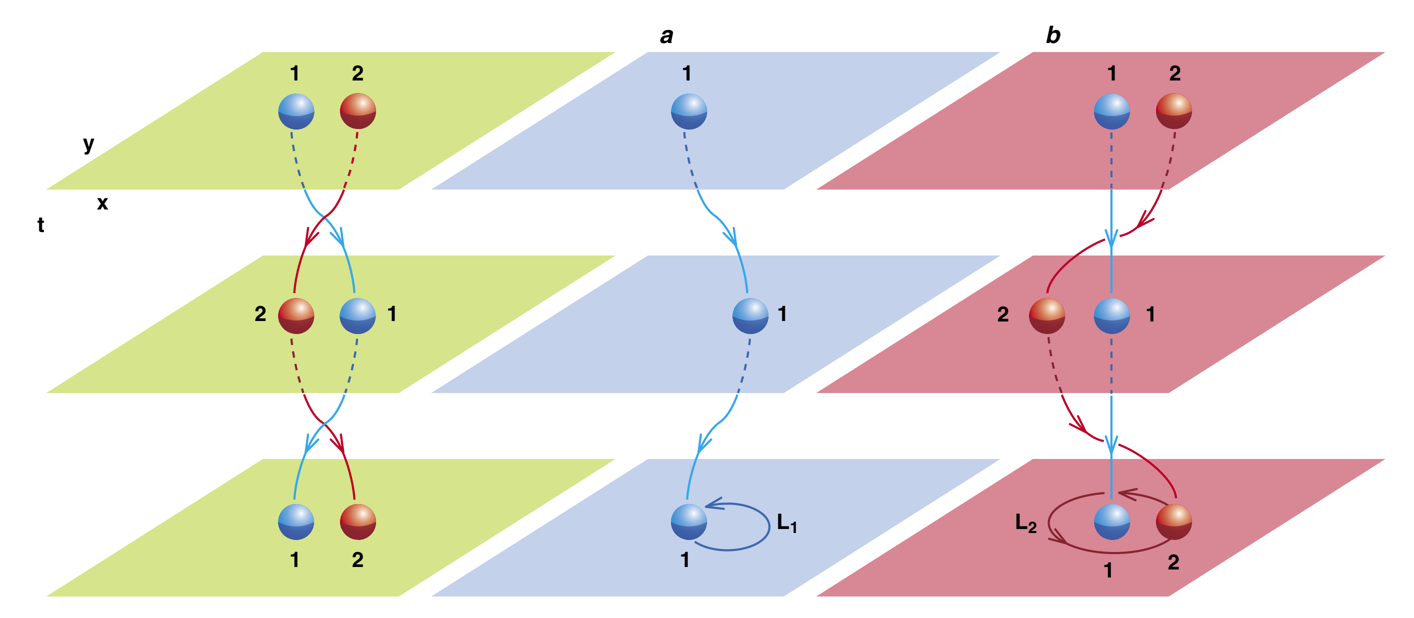
El efecto Hall cuántico fraccionario es un fenómeno que se observa aplicando a una heterojuntura (unión de dos semiconductores diferentes) un campo magnético perpendicular muy intenso. Los electrones que producen la conducción eléctrica se encuentran confinados en las proximidades de la unión de los dos semiconductores formando un sistema bidimensional. Pero en dos dimensiones el espacio de







5. EJEMPLOS DE ESPACIOS topológicamente no triviales. En primer lugar (*izquierda*) se ofrece el espacio tridimensional con un agujero en forma de eje infinito. El lazo L_2 que encierra al eje no es homotópicamente equivalente a L_1 que deja al eje fuera. Las clases de homotopía están formadas por los lazos que dan un mismo número de vueltas n en torno al eje. Notemos que el espacio sería topológicamente trivial si el agujero fuese puntual como en el plano. En segundo lugar (*centro*), una superficie cilíndrica infinita: de forma similar al caso anterior los lazos L_1 y L_2 no son homotópicamente equivalentes y las clases de homotopía están formadas por los lazos que dan un mismo número de vueltas n en torno al cilindro. Por último (*derecha*), una superficie toroidal: en este caso se puede rodear al toroide de dos formas distintas, bien transversalmente (como en el caso de L_2) o bien longitudinalmente (como en el caso de L_3), así que las clases de homotopía vienen caracterizadas por dos enteros n y m que miden el número de vueltas transversales y longitudinales que da cada lazo.



6. DESCOMPOSICION DE UN DOBLE INTERCAMBIO en el plano. Se ilustra en *a* la evolución espaciotemporal de la partícula 1 respecto de un observador ajeno al sistema. Su proyección espacial nos da la curva que dicho observador ve describir a la partícula 1 en el plano. En *b* la trayectoria roja indica la evolución espaciotemporal de la partícula 2 tal y como se percibiría desde la partícula 1. Igualmente su proyección espacial nos muestra la curva que 2 describe en el plano desde el punto de vista de la partícula 1. La curva *a* puede ser arbitraria, pero no así la curva *b*, que no puede pasar por el origen si hemos de evitar la superposición de las dos partículas.

configuración es topológicamente no trivial y, por consiguiente, el sistema de electrones puede presentar un comportamiento descrito por alones. De esta manera el efecto Hall cuántico fraccionario puede estar relacionado con el problema del acoplamiento electromagnético de los alones.

R. B. Laughlin fue un adelantado de la relación de los alones con el efecto Hall cuántico fraccionario. El modelo de Laughlin incluía también la predicción de que no sólo el espín y la estadística, sino también la carga eléctrica de los alones era una fracción de la carga del electrón. Experimentos recientes realizados en Inglaterra y Estados Unidos demuestran que las cargas eléctricas observadas en el efecto Hall cuántico fraccionario son fraccionarias.

La estadística fraccionaria podría aportar también bases teóricas al fenómeno de la superconductividad a altas temperaturas. Desde hace ochenta años se sabe que la pérdida de toda resistencia eléctrica y la exclusión de flujo magnético (superconductividad) es un fenómeno que presentan ciertos materiales a muy bajas temperaturas. Más recientemente, este fenómeno ha aparecido a temperaturas superiores en ciertos materiales que tienen como característica una estructura planar en su red cristalina y en la conducción eléctrica. Es esta estructura planar la que ha hecho pensar que el mecanismo de la superconductividad a alta temperatura podría ser característico de teorías bidimensionales.

Para averiguar si los alones describen la superconductividad en estos materiales podría investigarse si existe violación de la paridad asociada a la generalización del espín y la estadística. Sin embargo, en las estructuras planares *Cu–O* donde tienen lugar los efectos de superconductividad a altas temperaturas no hay signos de violación de paridad, lo que parece alejar a los alones de la explicación de este tipo de fenómenos. Con todo, los experimentos carecen de fuerza suficiente debido a la dificultad en precisar a nivel cuantitativo la violación de paridad que debería observarse si los alones fueran esenciales en la superconductividad a alta temperatura.

En cualquier caso, no debemos alinear a los alones en el rango de los electrones. El mundo es tridimensional y no hay cabida en él para partículas que no sean fermiones o bosones. Pero en ciertas situaciones extremas (pensemos en un gas de electrones fuertemente aprisionado en un plano o sometido a intensos campos magnéticos) grupos de partículas pueden aunarse formando un sistema altamente correlacionado, en el que los estados globales se comporten como un todo. A nivel macroscópico un sistema de este estilo se comportará como si sus componentes fundamentales tuvieran las propiedades de esos estados colectivos que responden a la denominación de cuasipartículas. Estas cuasipartículas pueden tener propiedades que nos recuerden a los alones, dotados de espín y estadística fraccionarios (o incluso carga fraccionaria como en el modelo de Laughlin). Los alones resultan así una forma eficaz de describir y estudiar situaciones que a nivel microscópico serían muy complicadas de tratar y de entender.

En resumen, la estadística fraccionaria no es simplemente un elegante ejemplo de la interconexión entre topología y física cuántica, sino que explica también el efecto Hall cuántico fraccionario y quizá la superconductividad a alta temperatura. Cabe esperar que la profundización en el entendimiento de la dinámica de sistemas de alones pueda en un futuro ayudar a identificar nuevos fenómenos característicos de sistemas bidimensionales de materia condensada.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TOPOLOGICAL QUANTUM FIELD THEORY AND THE JONES POLYNOMIAL. E. Witten, *Communications in Mathematical Physics*, vol. 117, n.º 353, 1988.

STATISTICS AND ANYON SUPERCONDUCTIVITY. F. Wilczeck, World Scientific, 1990.

ALONES. F. Wilczeck, en *Investigación y Ciencia*, julio de 1991.

La preparación del atleta olímpico

La ciencia y la técnica aplicadas al deporte posibilitan que los competidores de elite superen los estrechos márgenes necesarios para subir al podio de los vencedores

Jay T. Kearney



Recuerda la leyenda que, en la Grecia clásica, cierto atleta olímpico se propuso llegar a ser la persona más fuerte del mundo. Cada mañana, Milón de Crotona (*arriba*) agarraba una ternera, la alzaba sobre su cabeza y recorría así el establo. Al par que crecía el animal, crecían las fuerzas de Milón, hasta que logró levantar en peso la ya oronda vaca.

Milón, pentacampeón en el deporte de la lucha, intuyó lo que hoy día constituye uno de los postulados básicos de la ciencia aplicada al deporte. El entrenamiento progresivo de la resistencia, forzando los músculos con cargas crecientes, es algo que conocen perfectamente los más de 10.000 atletas que, procedentes de 197 países, participarán este mes de julio en la olimpiada de Atlanta, que coincide además con el centenario de los Juegos Olímpicos de los tiempos modernos.

A lo largo de los últimos cincuenta años, sin embargo, la ciencia ha refinado los principios del entrenamiento más allá de lo que los griegos vislumbraban. Los expertos en fisiología del deporte y los preparadores se basan en el avance de la ciencia para conseguir que los atletas participantes en cada una de las 29 especialidades de la olimpiada desarrollen todas sus potencialidades metabólicas y musculares. Los expertos en biomecánica hacen uso de ordenadores, sensores especiales y de vídeo para estudiar la dinámica de los movimientos. Los

ingenieros de diseño incorporan los últimos avances en materiales y en aerodinámica para construir piraguas ligerísimas o la bicicleta perfecta. Los psicólogos intentan que los atletas refuercen su autoestima a través de técnicas mentales. La conjunción de todos estos enfoques proporciona esas sutiles ganancias en la preparación del atleta que después se traducen en victorias.

El desarrollo del cuerpo

Para entender por qué el entrenamiento aumenta la fuerza y la resistencia necesarias para las pruebas olímpicas hemos de partir del conocimiento de los mecanismos de producción de energía por el organismo. Todo movimiento del cuerpo humano se apoya en el gasto, y nueva síntesis, de trifosfato de adenosina (ATP); esta molécula, rica en energía, consta de una base (adenina), un azúcar (ribosa) y tres grupos fosfato. La rotura del enlace entre dos unidades de fosfato libera la energía requerida para las contracciones musculares y otras reacciones celulares. La capacidad del hombre para almacenar ATP es muy limitada. A un ritmo máximo de esfuerzo, los cinco milimoles disponibles por kilogramo de músculo se consumen en escasos segundos. Para mantener la actividad, el organismo dispone de tres procesos metabólicos interrelacionados, que se encargan del suministro continuo de este compuesto. El predominio de uno u otro dependerá de los requerimientos energéticos de los músculos en un momento dado y de la duración de la actividad.

La fuente más inmediata de que disponemos para reconstruir el ATP es la fosfocreatina, compuesto rico en energía y portador de fosfato en su molécula. La energía liberada por la lisis de la molécula de fosfocreatina se aprovecha para resintetizar ATP. El sistema de la fosfocreatina puede recargar el ATP sólo durante un corto período —entre cinco y diez segundos—, el tiempo que dura un sprint. Cuando el suministro de esta molécula se agota, el organismo debe recurrir a otros dos procesos generadores de ATP: uno requiere oxígeno (aeróbico) y otro no lo necesita (anaeróbico).

El proceso anaeróbico, o de glicolisis, acostumbra ser el primero que se pone en operación. Las células degradan carbohidratos específicos (glucosa o glucógeno en el músculo) para liberar la energía con la que resintetizar ATP. Para infortunio del atleta, el metabolismo anaeróbico de los carbohidratos da lugar a la producción de ácido láctico que, a los pocos minutos, acaba acumulándose en los músculos. El ácido láctico y los iones de hidrógeno asociados con él causan un dolor muscular agudo. Pero el ácido láctico y su correspondiente forma ionizada, el lactato, que se acumula en el músculo, no siempre afectan al rendimiento. Gracias al entrenamiento, los músculos de los deportistas de elite se adaptan de tal modo, que pueden tolerar niveles elevados de lactato producido durante ejercicios muy intensos.

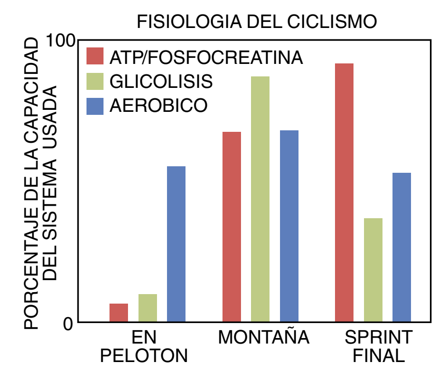
Pese a ello, el ácido láctico y el lactato terminan bloqueando la contracción muscular. En consecuencia, para cortos períodos de esfuerzo muy intenso sólo podemos contar con la glicolisis anaeróbica. Este proceso no puede, sin embargo, suministrar el ATP necesario para mantener la actividad en pruebas de duración prolongada. Dicha tarea recae sobre el metabolismo aeróbico: la degradación de carbohidratos, grasas y proteínas en presencia de oxígeno. A diferencia de la glicolisis anaeróbica, el sistema aeróbico no puede activarse de repente. Han de transcurrir al menos uno o dos minutos de ejercicio intenso antes de que el aumento del ritmo respiratorio y cardíaco asegure el suministro de oxígeno a las células musculares. En el intervalo, para conseguir la energía el atleta depende de una combinación del ATP almacenado, el sistema de la fosfocreatina o la glicolisis anaeróbica. Con la activación de los procesos aeróbicos, estos otros sistemas funcionan a un nivel más bajo. En la fase aeróbica, por ejemplo, se siguen produciendo ácido láctico y lactato, pero se consumen por músculos menos activos o se metabolizan en el hígado y, por tanto, no se acumulan.

Aunque el sistema aeróbico es muy eficiente, su capacidad para suministrar energía al músculo tiene un límite superior. Si se necesita más ATP, el músculo debe poner en marcha otras fuentes de energía distintas. Un jugador de fútbol, mediado el primer tiempo de 45 minutos, por ejemplo, depende fundamentalmente del metabolismo aeróbico. Pero si necesita realizar un sprint, su organismo ha de recurrir al ATP almacenado o al ATP reconstituido por el sistema de la fosfocreatina que suplemente al sistema aeróbico. De modo semejante, si ese sprint de intensidad elevada continúa durante un período de cinco a quince segundos, la glicolisis anaeróbica del jugador experimenta un rápido aumento. Al terminar el partido, el organismo retorna al sistema metabólico aeróbico, mientras se regeneran las capacidades de los otros sistemas suministradores de energía.

Los preparadores deben conocer las exigencias de su especialidad deportiva y ajustar la intensidad y duración del entrenamiento para mejorar el funcionamiento aeróbico o anaeróbico del atleta. El principio fundamental

JAY T. KEARNEY, doctor en fisiología del ejercicio por la Universidad de Maryland, pertenece al equipo médico del Comité Olímpico de los Estados Unidos. De 1974 a 1986 enseñó en la Universidad de Kentucky. De 1988 a 1992 dirigió la sección de ciencia y técnica del Centro de Entrenamiento Olímpico de los Estados Unidos en Colorado Springs. Para la redacción de este artículo ha contado con la colaboración de Susan Mulligan.

1. CON LA ESPERANZA DE UNA MEDALLA, Betsy y Mary McCagg se entrenan juntas en la sede del equipo estadounidense de remo en Chattanooga, Tennessee. Aunque estas dos gemelas se entrenan en pareja, participarán en Atlanta en las regatas femeninas de ocho.



2. LOS REQUERIMIENTOS fisiológicos del ciclismo varían de una prueba a otra. Un corredor hará uso del ATP almacenado, recurrirá al sistema de fosfocreatina o dependerá de la glicolisis anaerobia para obtener la energía adicional necesaria para subir una pendiente o acometer un sprint final.

del entrenamiento es que una actividad prolongada adaptará los músculos a un nivel creciente de demanda, una versión en fisiología deportiva del modelo de estímulo-respuesta. Con el tiempo, el entrenamiento inducirá los cambios fisiológicos adecuados a las necesidades de un deporte específico. El entrenamiento del corredor de fondo, por ejemplo, atiende a la potenciación de la capacidad de su sistema aeróbico. El levantador de peso, por contra, ha de concentrarse en la fuerza y en la potencia, en vez de desarrollar la resistencia, que es característica de los deportes de fondo.

Cubriendo la distancia

Para el preparador olímpico, el entrenamiento se convierte también en una administración juiciosa de las mejoras, de cuantía decreciente. Durante el primer año, el atleta podría invertir entre 50 y 100 horas de entrenamiento para mejorar de un 10 a un 15 por ciento en una temporada. En el pico de su carrera deportiva, el mismo atleta podría invertir unas 1000 horas de esfuerzo intenso y concentrado para lograr un exiguo progreso del uno por ciento. Tan leve ganancia podría parecer muy pobre en relación con lo que se ha invertido. Pero no hemos de olvidar que el margen en una victoria en las pruebas de velocidad de la olimpiada de Barcelona —la diferencia entre una medalla de oro y una de plata— fue sólo de poco más de dos décimas de segundo.

Para adentrarse en los pormenores de la planificación de los entrenamientos por parte de preparadores y atletas, conviene fijarse en ejemplos de distintas especialidades deportivas. En los Juegos de Atlanta, la competición más larga será la carrera ciclista, con unas cinco horas de duración. Recorrerán sus 228 kilómetros ciclistas cuyo entrenamiento se ha optimizado para lograr un esfuerzo aeróbico persistente, al mismo tiempo que se aprovecharán los avances obtenidos por la técnica de la aerodinámica de la máquina. Uno de los favoritos es Lance Armstrong de Austin, Texas, ganador del campeonato del mundo en 1993.

Las cualidades innatas de Armstrong se manifestaron desde muy pronto. A los 15 años tenía una capacidad aeróbica que le situaba entre el 1 y el 2 por ciento de los mejores atletas del mundo. Indice de la capacidad cardiorrespiratoria global, llámase capacidad aeróbica a la cantidad máxima de oxígeno que puede captarse y distribuirse a las células musculares para que la utilicen en la síntesis de ATP. Se conoce también dicho parámetro por consumo máximo de oxígeno, o VO_2máx. Armstrong registró entonces un consumo máximo de oxígeno de 80 mililitros de oxígeno por kilogramo de peso corporal por minuto, un ritmo que sigue manteniendo a la edad de 24 años. Ese valor representa casi el doble de lo que suele ser la media de un adulto en buena forma.



En el marco de su preparación para los Juegos de Atlanta, Armstrong ha pasado varias veces por el centro de entrenamiento de Colorado Springs que posee el Comité Olímpico estadounidense. Se sometió allí a un estudio metabólico completo, que implicaba realizar una serie de pruebas en un ergómetro de bicicleta, una máquina que se utiliza en el laboratorio de fisiología deportiva para registrar la carga, es decir, el esfuerzo y la intensidad del pedaleo. Mientras pedaleaba en el ergómetro, se tomaron

PREDICCION DE MEJORA DE TIEMPO

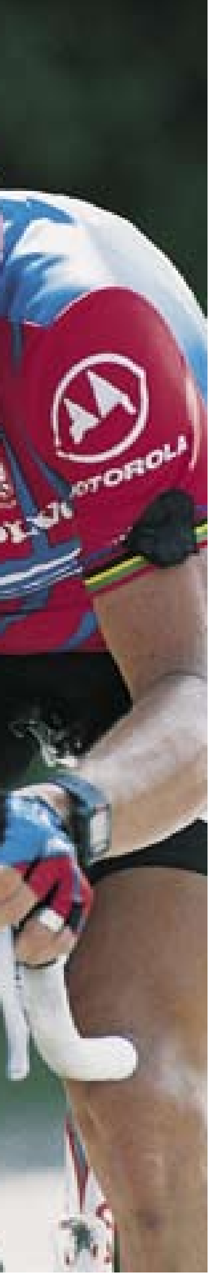
TIEMPO (MINUTOS:SEGUNDOS)

SOLO MODIFICACIONES DE ENTRENAMIENTO

COMBINACION DE MODIFICACIONES DE ENTRENAMIENTO Y AERODINAMICA

UMBRAL DE LACTATO (PORCENTAJE DEL CONSUMO MAXIMO DE OXIGENO)	SOLO MODIFICACIONES DE ENTRENAMIENTO	COMBINACION DE MODIFICACIONES DE ENTRENAMIENTO Y AERODINAMICA
75	53:54,5	53:03,7
80	52:25,5	51:13,6
85	51:14,9	50:01,9

3. UN ANALISIS de la forma de correr de Lance Armstrong (*foto superior*) se realizó en el centro de entrenamiento olímpico de Colorado Springs. Se le recomendaron cambios en su posición de pedaleo, para mejorar las condiciones aerodinámicas, y en los ejercicios de preparación, con el fin de elevar su umbral de lactato y retardar, por tanto, la acumulación de este metabolito. Tras seguir los consejos, redujo su tiempo en casi cuatro minutos en una carrera de 40 kilómetros.



mediciones del VO_2máx, la frecuencia cardíaca y los niveles de ácido láctico. Armstrong dio un VO_2máx superior al de cualquier otro ciclista estadounidense. En el momento de máxima intensidad del esfuerzo de pedaleo desarrolló una potencia de 525 watts.

4. EL PEDALEO de Armstrong se analizó en el centro de entrenamiento de Colorado. La longitud y el ángulo de las flechas indican la magnitud y dirección de las fuerzas aplicadas por el pie izquierdo de Armstrong. El diagrama reveló que necesitaba ejercer mayor fuerza en la parte superior y en la inferior del ciclo en la dirección de la rotación.

Los fisiólogos recurren a otras dos pruebas para medir la forma física: en una se valora el rendimiento del consumo de oxígeno por parte del atleta y en la otra se determina la rapidez de acumulación de ácido láctico en los músculos. Esta última medida, el umbral de lactato, se representa en porcentaje de VO_2máx. Por encima de dicho umbral el lactato comienza a acumularse y provoca dolor y quemazón.

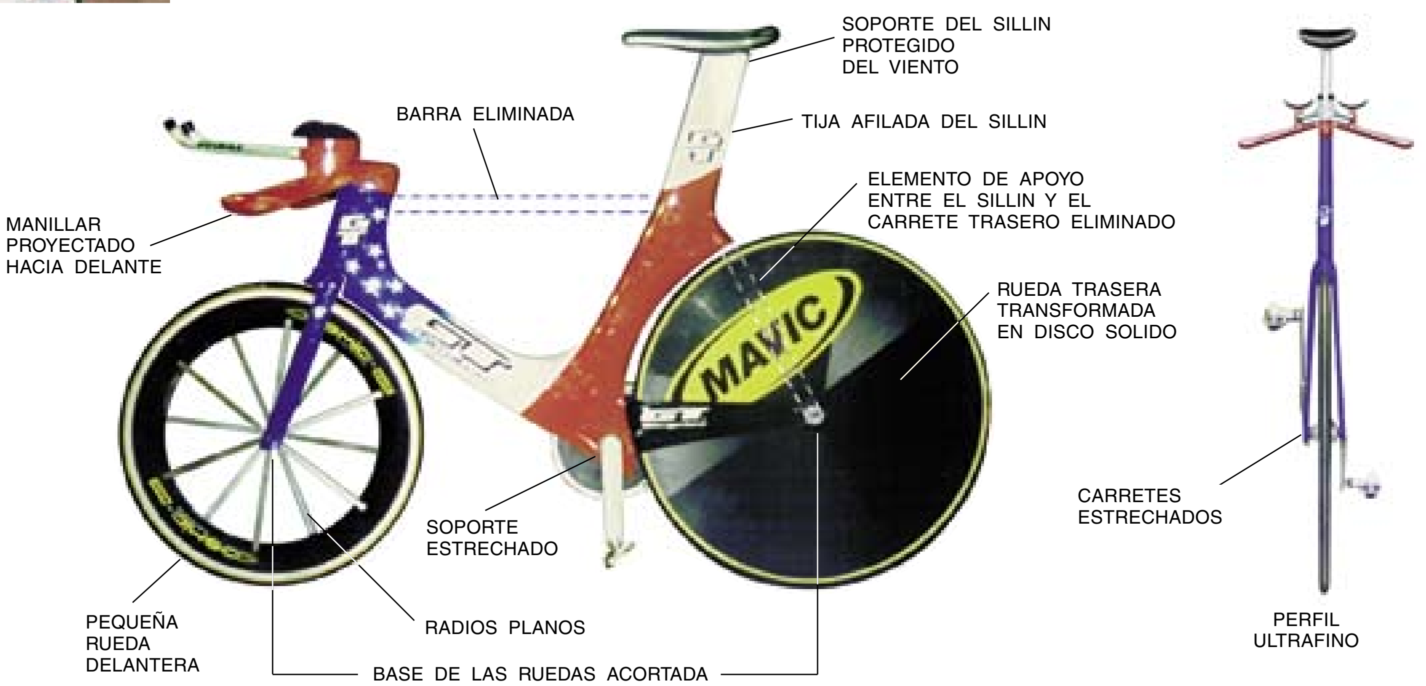
Armstrong presentó un umbral de lactato del 75 por ciento, que resultó ser un diez por ciento menos que la media de los mejores ciclistas del equipo nacional norteamericano. Tras los exámenes, el equipo de valoración recomendó entrenamientos más frecuentes, cercanos o ligeramente superiores a su propio umbral. Con esta intensidad de entrenamiento se producen cambios en las funciones circulatorias, nerviosas y enzimáticas, que ayudan a mejorar el umbral del lactato, retrasando por tanto la acumulación de este metabolito.

El entrenamiento para mejorar la capacidad fisiológica es sólo una de las vías, a veces ni siquiera la principal, si se quiere aumentar el rendimiento en un deporte que como el ciclismo se apoya en la técnica. Durante las visitas de Armstrong a Colorado Springs, hemos estudiado también su técnica de pedaleo, su posición en la bicicleta y el diseño de ésta.

En el laboratorio de biomecánica Armstrong pedaleó en una bicicleta estacionaria, que medía la magnitud y la dirección de la fuerza ejercida sobre los pedales. Jewffrey P. Broker determinó que Armstrong pedaleaba de manera casi idéntica con la pierna derecha que con la izquierda. Sólo se detectó una ligera deficiencia sin gran importancia en la fuerza de propulsión en la parte superior e inferior del ciclo de pedaleo.



5. LA AERODINAMICA ha preocupado a los diseñadores de bicicletas desde la primera mitad del siglo, como se observa en las bicicletas de carrera de entonces que estaban equipadas con una especie de dosel o envoltura para reducir la resistencia del aire (*arriba*). Las bicicletas más avanzadas de nuestros días se experimentan ya en la pista de carreras. El modelo SB II, o Superbicicleta II (*abajo*), tiene un cuadro de fibra de carbono muy ligero. En su diseño entran también toda una serie de elementos aerodinámicos.





Más estimulante fue el resultado del análisis de la posición del cuerpo. La resistencia del aire que se opone a la bicicleta y el corredor aumenta con el cuadrado de la velocidad y puede afectar a la velocidad. La posición del corredor sobre la máquina adquiere tanta importancia, que algunos ciclistas adoptan posturas harto extrañas. Graham Obree, que en 1995 ganó el campeonato del mundo de carrera de persecución individual y el récord de la hora en 1994, sacaba la cabeza muy por delante del manillar. Corría con los brazos completamente metidos debajo del pecho, que a su vez apoyaba sobre el manillar. Esta posición de Obree, tan alejada de las habituales y tan difícil de dominar por otros ciclistas, fue prohibida por la Unión Ciclista Internacional, que la consideró inestable y peligrosa.

Para estudiar la posición de Armstrong sobre la bicicleta nos servimos de los vídeo de actuaciones suyas en competiciones y en el centro de entrenamiento. Quedó claro que tenía que bajar el tronco para reducir la resistencia. El amplio espacio que dejaba entre los brazos permitía que el aire se acumulase contra la parte superior del torso, lo que le obligaba a una potencia mayor a cualquier velocidad que si adoptaba una postura más aerodinámica. Además, la posición de su cabeza hacía que el casco chocase con la corriente de aire. Le sugerimos que adelantara el sillín y lo empinara un poco, adelantara y rebajara el manillar y adelantara por último sus manos sobre las "aerobarras" (extensiones aerodinámicas del manillar estándar).

Se le recomendaron cambios en el diseño del casco, que debería prolongarse en una suerte de cola al objeto de conseguir un flujo más suave de la corriente sobre la cabeza y hacia la espalda. Comprobamos en las pruebas de potencia que con la posición corregida Armstrong mejoraba la velocidad en 1,44 kilómetros por hora. Si a ello agregamos diversas mejoras fisiológicas recomendadas, el ciclista podría rebajar cuatro minutos en una carrera de 40 kilómetros.

Preparación física aparte, el equipo ciclista norteamericano contará con máquinas de avanzadísimo diseño. De ello se ha encargado el Proyecto 96, un empeño conjunto de tres entidades norteamericanas: la Federación Ciclista, el Comité Olímpico nacional y la Asociación de América. Los ingenieros han ponderado cada centímetro cuadrado de estructura para conseguir la máxima aerodinámica. Han reducido el tamaño de la rueda delantera y la han estrechado para cortar la resistencia del viento y permitir que el grupo pueda ir a la rueda a una menor distancia. Además, al emplear materiales compuestos, de una mayor resistencia, se ha aligerado el apoyo estructural necesario. Los tubos que forman el cuadro de la bicicleta ordinaria se han sustituido por elementos estructurales que se van afilando de delante a atrás en



6. **TIM McRAE, miembro del equipo estadounidense de halterofilia, ejecuta un ejercicio de entrenamiento en el centro de Colorado Springs (*izquierda y arriba*). Dos cámaras de alta velocidad fotografían los movimientos del atleta para registrar el desarrollo de los mismos (*abajo a la derecha*). La combinación de los vídeos ofrece una imagen tridimensional que permite analizar la técnica de levantamiento.**

forma de lágrima, como el ala de un avión.

El estudio de cada uno de los aspectos de la forma física de Armstrong ha permitido mejorar su preparación para la olimpiada. Su umbral de lactato se ha elevado del 75 al 79 por ciento. Ahora se entrena o participa en competiciones que suman un total de 40.000 kilómetros al año. (Este rendimiento contrasta con los 1600 kilómetros más o menos que solía hacer cuando tenía 15 años.) Ha obtenido también óptimos resultados en competiciones recientes.

La halterofilia se encuentra en el otro extremo del espectro fisiológico. Si el ciclismo es la competición de mayor duración de la olimpiada, el levantamiento de peso es la más corta. La resistencia que se reclama en aquél, se sustituye en éste por una fuerza y una potencia extremas. El acto de levantar entre 120 y 250 kilogramos requiere una potencia de 3000 watts, suficiente para iluminar 50 bombillas de 60 watts cada una durante un segundo. Para estas pruebas, el atleta ha de valerse del ATP almacenado en sus músculos y en la regeneración del trifosfato a partir de la fosfocreatina. En el entrenamiento, durante el largo intervalo de recuperación entre cada serie de cinco levantamientos, estos sistemas energéticos se vuelven a cargar aeróbicamente.

El entrenamiento en los países del este de Europa

La posibilidad de ganar una medalla en Atlanta es muy reducida para quienes no provengan de la antigua Europa socialista, donde los programas de levantamiento de peso han sobrevivido al hundimiento del sistema. Algunos, sin embargo, han comenzado a adoptar sus métodos de entrenamiento; por ejemplo, los atletas norteamericanos.

Dragomir Cioroslan, preparador rumano que ganó una medalla de bronce para su país en la olimpiada de 1984, ha fichado por el equipo de levantamiento de pesos del centro de Colorado. Cioroslan ha establecido un programa riguroso de un año de duración basado en su dilatada experiencia de entrenador. Tim McRae es uno de los favoritos del entrenador. Posee un tronco en forma de yunque y mide 160 centímetros.

McRae puede levantar más del doble de su propio peso, una gesta que le ha permitido convertirse en pentacampeón de los Estados Unidos y poseer el récord de su país en tres categorías de dos de las especialidades principales de competición: la de arrancada y la de fuerza o dos tiempos. En la de arrancada el atleta eleva la barra por encima de su cabeza hasta tener los brazos completamente estirados hasta que el juez indica el relajamiento. En la especialidad de fuerza sujeta la barra a la anchura de los hombros, la eleva hasta la altura de éstos, efectuando con las rodillas una flexión. Después la impulsa hacia arriba con los brazos totalmente estirados. Y por ultimo, después de una pausa, estira el cuerpo, los brazos y las piernas en un esfuerzo explosivo.

La complexión de McRae —extremidades cortas, torso largo y gran masa muscular— es muy adecuada para la halterofilia. Su baja estatura hace que sólo tenga que levantar la barra una distancia corta. La habilidad más notable de McRae puede verse cuando salta casi un metro desde una posición de reposo, una demostración del tipo de potencia que posee en las piernas y que necesita para el levantamiento de pesos.

La halterofilia es el deporte ideal para ilustrar otro de los conceptos fundamentales de la preparación atlética: la periodización. Se trata del desarrollo, estructurado y secuencial, de la habilidad atlética o capacidad fisiológica mediante la organización del entrenamiento en bloques de tiempo. Los períodos de tiempo señalados van desde un ejercicio aislado hasta ciclos anuales. Los levantadores de pesos se preparan durante dos o cuatro meses para una competición a través de un macrociclo, un período que comprende varios mesociclos, o segmentos más cortos.

Cioroslan programa para el equipo estadounidense tres o cuatro macrociclos durante el año. Cada macrociclo termina con una competición. Comienza un macrociclo con una fase preparatoria, un mesociclo que dura de ocho a diez semanas. A lo largo de cada una de éstas, McRae y otros atletas realizaran 600 levantamientos de pesos un 80 o 90 por ciento del peso máximo que son capaces de alzar. Con tales ejercicios de elevado volumen y de intensidad media se producen cambios en la musculatura, tejido conjuntivo, ligamentos y otros tejidos blandos, modificaciones que capacitan a los atletas para tolerar el levantamiento de pesos mayores en la siguiente fase de entrenamiento.

Viene luego un segundo mesociclo, que dura otras cuatro o cinco semanas. La meta se halla ahora en incrementar la fuerza y la potencia





7. EL ENTRENAMIENTO DE LA FUERZA con pesos es una parte esencial del régimen de las hermanas McCagg y del resto de las componentes del equipo de remo de los Estados Unidos. Pero este tipo de entrenamiento es sólo una parte de la rutina de periodización: el ciclo completo de ejercicios a lo largo de un año, un cuatrimestre (macrociclo, que no se muestra), un mes (mesociclo), una semana y un día (*gráficos y tabla en la página siguiente*). El volumen, intensidad y tipo de entrenamiento van cambiando cuidadosamente hasta llegar a un periodo de descanso.

mediante pocas repeticiones (de 200 a 300 por semana), aunque usando pesos mayores que requieren entre el 90 y el 100 por ciento de la capacidad de alzada del atleta. El más fuerte de los atletas de Cioroslan puede llegar a levantar más de tres millones de kilogramos al año.

El mesociclo final abarca dos fases, que concluyen con la competición. Durante la primera, el atleta trabaja a una intensidad máxima para asegurar que los incrementos ganados en fuerza y potencia se traduzcan en un rendimiento competitivo. En la última semana de este mesociclo se suavizan progresivamente los entrenamientos: la reducción del volumen e intensidad del ejercicio permiten que el atleta se recupere del estrés del esfuerzo realizado sin perder los beneficios de la preparación intensiva.

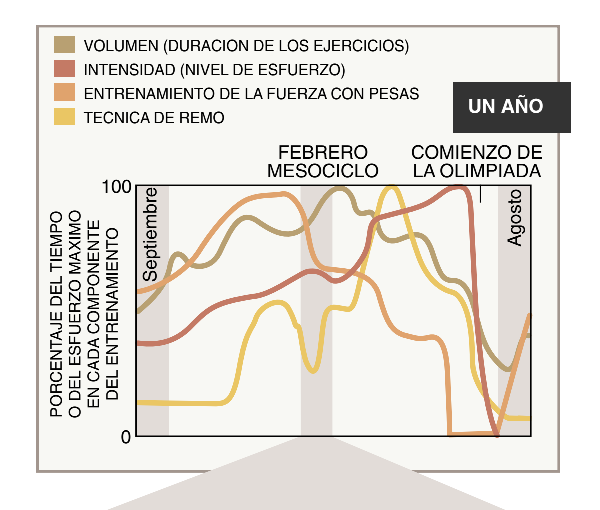
Amén de aplicar los principios fisiológicos al entrenamiento, los levantadores de pesos sacan también partido de un aparataje de control muy perfeccionado. La halterofilia constituye uno de los deportes más exigentes desde el punto de vista técnico, en el que se requiere la intervención de una secuencia específica de músculos. Si cada grupo muscular, desde los extensores de la rodilla y de la cadera hasta los músculos de hombros y brazos, no se activa de manera secuencial, el atleta no logrará levantar la barra lo suficiente o puede tambalearse hacia atrás y hacia delante.

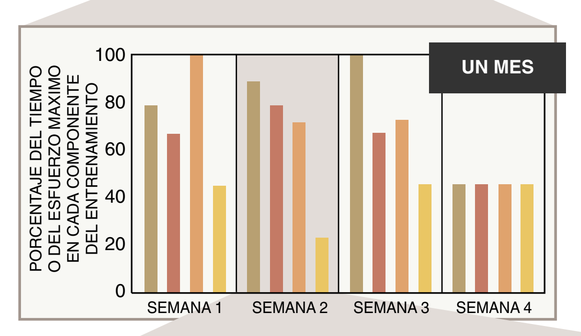
Sarah L. Smith, del centro de Colorado, sometió a McRae a pruebas especiales para ver la regularidad de la trayectoria en S que la barra debe recorrer desde el suelo hasta la extensión completa. Se sirvió de dos cámaras y dos plataformas, dotadas de sensores que registran la fuerza aplicada a cada pie. Si la carga de un pie difiere de la del otro, el atleta perderá la simetría entre sus manos; es decir, podría elevar un lado de la barra antes que el opuesto. La prueba demostró que las asimetrías del levantamiento de McRae provocaban una desestabilización, lo que obligó a varias correcciones de la técnica.

La genética también cuenta

La capacidad de McRae para levantar más de dos veces su propio peso puede ser algo que le viene de nacimiento, de su temprana iniciación en el deporte o de ambas cosas. Se atribuye al fisiólogo Per-Olof Åstrand el aforismo que dice: “Si quieres llegar a olímpico, empieza por escoger a tus padres.” Que la genética desempeña probablemente al menos algún papel lo demostró ya en los años ochenta Claude Bouchard, de la Universidad de Laval en Quebec, en sus trabajos sobre gemelos idénticos. Vio que algunas parejas de hermanos gemelos sedentarios doblaban casi su consumo máximo de oxígeno tras 15 o 20 semanas de entrenamiento físico, mientras que otros sólo experimentaban una modesta mejoría. Se infirió de ello que debía existir una base genética de la fisiología superior de los atletas destacados. Bouchard busca ahora marcadores genéticos que permitan distinguir entre quienes responderán al entrenamiento con avances espectaculares y quienes progresarán menos.

Aunque ninguno de los programas de entrenamiento de elite se dedica al descubrimiento directo de candidatos con genes “atléticos”, sí suelen atender a algo que se acerca bastante. El conjunto de características físicas que definen a un atleta en potencia —selección sistemática de jóvenes basada en rasgos que de-





UNA SEMANA

	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES	VIERNES	SABADO	DOMINGO
MAÑANA	ENTRENAMIENTO DE RESISTENCIA AEROBICA	ENTRENAMIENTO DE RESISTENCIA AEROBICA		ENTRENAMIENTO EN EL UMBRAL DE LACTATO	ENTRENAMIENTO DE RESISTENCIA AEROBICA	ENTRENAMIENTO EN EL UMBRAL DE LACTATO	EJERCICIOS INDIVIDUALIZADOS
MEDIODIA	ENTRENAMIENTO DE FUERZA CON PESAS	EJERCICIOS ANAEROBICOS MUY INTENSOS	ENTRENAMIENTO DE FUERZA CON PESAS		ENTRENAMIENTO DE RESISTENCIA AEROBICA		
TARDE			CARRERA MANTENIDA	ENTRENAMIENTO DE FUERZA CON PESAS	CARRERA MUY INTENSA		

15 series de 15 estrepadas al 100 por ciento de esfuerzo máximo

Carrera de ocho km

15 series de 400 metros

Cuatro series de 10 minutos cada una a un ritmo cardíaco de 190 pulsaciones por minuto

De tres a cinco series de hasta 10 ejercicios diferentes de levantamiento de peso repetidos entre 5 y 10 veces con el 75-90 por ciento del esfuerzo máximo

Cuatro series de 25 minutos cada una a un ritmo cardíaco de 148 a 160 pulsaciones por minuto

penden de un condicionamiento genético— se ha convertido en criterio de orientación para muchos programas nacionales; lo fue en particular para la extinta Alemania Oriental. Pero los australianos han demostrado que ese método puede aplicarse en países libres. La federación australiana de remo colabora con preparadores y fisiólogos en la creación de un perfil de mujer que pueda convertirse en una virtuosa del remo. Prestan una atención central a la altura, proporción de grasa corporal, longitud de las extremidades y potencia del sistema cardiovascular. Las atletas que no reúnan las características ideales no quedan, sin embargo, excluidas del programa. Los australianos han demostrado que, gracias a este programa, puede obtenerse un equipo de categoría mundial en dos años.

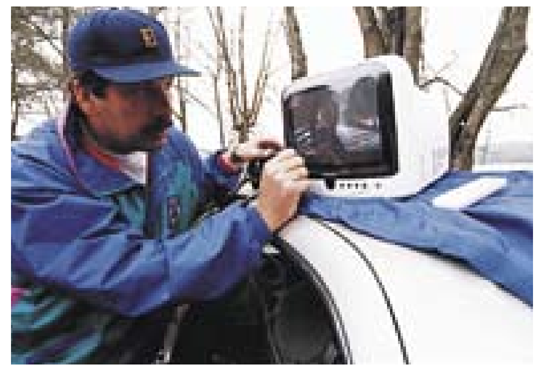
Si hubiera en los Estados Unidos un programa semejante, Mary y Betsy McCagg, gemelas idénticas, habrían estado entre las elegidas. Las hermanas McCagg, baluartes del equipo femenino de remo, son dos superdotadas para este deporte. Miden 188 centímetros y pesan 79 kilogramos. Las dos poseen una proporción de grasa corporal inferior a la media de los universitarios varones (lo que significa que la mayor parte de su peso corresponde a la masa muscular), así como unas piernas largas que facilitan la ejecución de una estrepada poderosa.

El ejemplo de las hermanas McCagg pone de manifiesto que los genes sólo cuentan en un ambiente propicio para el desarrollo del propio potencial físico por medio del entrenamiento. En su familia hay un largo historial de afición al deporte. El padre y el abuelo de las McCagg —al igual que muchos otros miembros de la familia— participaron en competiciones de remo en sus años estudiantiles en la Universidad de Harvard y en otras instituciones del este de los Estados Unidos. Tras concluir la enseñanza media con un programa excepcional de preparación para el remo, las McCagg ingresaron en el colegio universitario Radcliffe, de reputada tradición en el remo femenino. Era el destino ideal para ellas. Al poco de su matrícula formaron ya parte del equipo de remo. Mientras ellas participaron, el equipo no conoció la derrota.

Las hermanas McCagg compiten en equipos femeninos de ocho o de dos. En su especialidad manejan un remo largo con ambos brazos. Recorren 2000 metros en algo más de seis minutos, lo que requiere un buen equilibrio de cualidades atléticas: fuerza muscular combinada con una elevada capacidad aeróbica, así como facilidad para conseguir una mayor potencia muscular a través de la vía anaeróbica.

El equipo femenino de remo vino a Colorado Springs en 1991 para someterse a una serie de pruebas, de las que pudiéramos inferir su estado biológico y biomecánico; queríamos determinar también el motivo de su bajón en los últimos 500 metros de carrera. Los preparadores atribuían esa caída a que no habían conseguido desarrollar la necesaria capacidad anaeróbica y, por tanto, no lograban aumentar la potencia de estrepada que se requiere en un sprint final. Pero las pruebas del centro acabaron por revelar que el equipo había alcanzado un nivel de forma anaerobia comparable al de los mejores remeros del mundo; de lo que adolecían las atletas era de la suficiente capacidad aerobia que les





8. LAS HERMANAS McCAGG dispuestas con sus remos a iniciar la sesión diaria de entrenamiento en el río Tennessee; su preparador, Harmut Buschbacher, observa un vídeo de las dos hermanas remando.

9. TAMMY FORSTER se preparó para las pruebas preolímpicas en tiro de 50 metros en el centro de entrenamiento de Colorado Springs. Forster no se clasificó para formar parte del equipo olímpico.

permitiese recorrer los primeros 1500 metros de la carrera sin acumular niveles comprometedores de lactato.

Adelantado ya ese año de 1991, llegó a los Estados Unidos alguien con ideas sobre cómo resolver el problema del último tramo. Hartmut Buschbacher, que había sido preparador del equipo femenino de remo de Alemania Oriental, se hizo cargo del equipo norteamericano. (Un equipo juvenil de la República Democrática de Alemania, entrenado por Buschbacher, derrotó en 1985 al estadounidense en que entonces se integraban las hermanas McCagg.)

Al poco de llegar, Buschbacher organizó un programa de entrenamiento intensivo en Chattanooga, Tennessee, con un grupo de 15 atletas escrupulosamente seleccionadas. Sus métodos eran los contrastados con óptimos resultados en Europa. Aplicó la periodización, alternando combinaciones de volumen e intensidad de entrenamiento que ayudaran a corregir el déficit aeróbico. Que la estrategia de Buschbacher era la acertada se ratificó el verano de 1995, cuando las hermanas McCagg, que formaban parte de una tripulación de ocho, ganaron la prueba en el campeonato del mundo celebrado en Tampere, Finlandia.

Práctica mental de la puntería

Las pruebas de tiro y arco dependen más de la habilidad y de la preparación mental que de la fuerza bruta. En esas lides olímpicas las mujeres pueden igualar o superar las marcas de los hombres. A Tammy Forster, especialista en tiro de 27 años, se le despertó el interés por ese deporte delante de la televisión. Tenía cuatro años cuando vio en la pantalla las tablas ejecutadas por la gimnasta Olga Korbut, ganadora de una medalla de oro. Se dijo a sí misma que algún día participaría en las olimpíadas, y se aprestó a recorrer con firmeza el largo camino que la llevaría a ganar el campeonato nacional e internacional. En el patio de su casa, su padre, un experto en el manejo del rifle y participante ocasional en algunos concursos, enseñó a toda la familia a utilizar y cuidar las armas.

La participación paterna en la determinación de una



10. BLANCO EN TAMAÑO REAL (*arriba a la izquierda*) para una de las pruebas en que los atletas disparan desde una distancia de 10 metros (*izquierda*). Un sistema de láser detecta los puntos sobre los que Forster dirige el rifle (*arriba*).



10. EL CALZADO DE TIRO estabiliza el disparo del atleta erguido.

futura atleta, como fue el caso de las hermanas McCagg, volvía a repetirse con Tammy Forster. Le buscó la asistencia técnica necesaria, y su padre es hoy uno de sus preparadores.

A los 15 años, Forster dedicaba 90 minutos diarios al entrenamiento con un rifle de pequeño calibre (0,22) sin cargar. Esta mujer, todo un ejemplo de lo que puede conseguirse con perseverancia, nos ofrece una muestra de cómo un entrenamiento intenso puede compensar la falta de capacidad innata. Tammy veía que su hermana lograba los mismos resultados que ella con sólo entrenarse la cuarta parte del tiempo. Tammy siguió esforzándose. En 1985 ganó una medalla de plata en una competición nacional juvenil, y en 1985 eligió la Universidad de Virginia Occidental para entrenarse con Ed Etzel, que fue medalla de oro en la olimpiada de 1984.

Forster vino en 1991 al centro de Colorado Springs. Su estancia allí le ha permitido entregarse intensamente a los entrenamientos para la prueba de rifle de 10 metros y la prueba de tiro de tres posiciones. Esta última requiere que se dispare con un rifle de pequeño calibre sobre blancos situados a 50 metros mientras se mantiene una posición tumbada, de rodillas y de pie. Tammy ha puesto especial ahínco en las técnicas de concentración mental. Así ha progresado en su rendimiento, aunque no consiguió ganar una de las pruebas preliminares abiertas de 10 y 50 metros en las que participaba con el equipo olímpico estadounidense. El entrenamiento de Forster, sin embargo, nos ofrece un buen ejemplo de los beneficios que la psicología aporta al deporte.

Para llegar a las raíces de la psicología del deporte, hay que remontarse más de un siglo, cuando Norman Triplett descubrió que los atletas rendían mucho más si competían entre sí que si lo hacían contra el reloj. La psicología del deporte comenzó a ponerse de moda en los años setenta, cuando empezaron a aplicarse una serie de técnicas cognitivas y de comportamiento en el entrenamiento de los atletas. Se demostró entonces que el propio ejercicio mental mejoraba por sí solo el rendimiento motor.

En la preparación de Tammy se recurre a diversas técnicas: ejercicios de relajación muscular, visualización mental de la prueba y anotación de progresos y emociones en un diario. También se señala una serie de objetivos realistas que ella puede cumplir en cada sesión práctica.

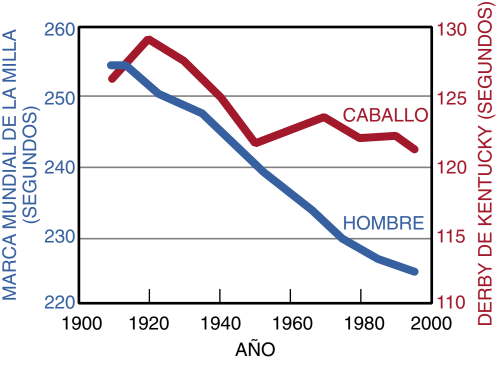
Los ejercicios de relajación permiten incrementar la concentración y reconocer las fuentes de tensión muscular en hombros y espalda que puedan afectar a la precisión del disparo. Durante la visualización, Forster puede imaginarse a ella misma haciendo puntería y disparando; en otras ocasiones se imagina que es ella misma quien, como una espectadora, se contempla mientras realiza una prueba. Toda esta imaginería mental influye de manera positiva en el rendimiento de las pruebas cuando tiene el rifle entre las manos.

En la competición, Forster repite una rutina de visualización antes de cada disparo. Por su mente van pasando en cámara lenta cada una de las etapas, desde el momento en que se sitúa de pie en la línea de tiro hasta colocar el rifle en posición de tiro y el instante del disparo. Repite toda esa escenografía mental antes de cada uno de los 60 disparos de que consta la competición de tres posiciones. En ese proceso de interiorización calmada antes de cada disparo, pueden trascurrir hasta dos horas y media, entre preparación y disparos, tiempo límite de una prueba de tiro. Mas para decidir quién es el ganador se tiene en cuenta la puntería, no la rapidez, con que ha dado en el blanco en más del 90 por ciento de los disparos realizados en las dos pruebas.

Nuestra atleta ha contado también con la asistencia de Sean McCann, psicólogo especialista en deportes olímpicos, quien le ayuda a rebajar su afán perfeccionista, causante en ocasiones de pérdida de autoconfianza en la precisión de su puntería. Para examinar el nivel de su técnica, disparó un rifle equipado con láser de rayos infrarrojos. El análisis del recorrido del haz indicó que en la puntería apenas se percibía el más ligero defecto. Pero ella intentaba continuamente hacer ajustes, con lo que su capacidad para mantener fija la puntería sobre el blanco se deterioraba después de cinco o seis segundos.

McCann ayudó a Forster para que desarrollase una rutina de visualización en la que debía recitar ciertas palabras de seguridad —“relájate”, “lista” y otras— que facilitaban su concentración y eliminaban esos temores. La constancia paga dividendos. Durante su estancia en el centro de entrenamiento, Forster ha ganado dos copas en competiciones mundiales, y el año pasado ocupó el segundo puesto en los campeonatos nacionales de los Estados Unidos.

La combinación de preparación física y adiestramiento de la mente, a la que recurre la regatista o la tiradora, encuentra aplicación en toda la gama de los 29 deportes olímpicos, desde la natación hasta el baloncesto. La ciencia y la técnica aplicadas al deporte han contribuido a establecer una tendencia de superación de las plusmarcas, tendencia menos firme en las carreras de caballos. Podemos dar por seguro que los Juegos Olímpicos de Atlanta representarán de nuevo un reto a las hazañas deportivas que el hombre puede escribir.



BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TRAINING FOR SPORTS AND ACTIVITY: THE PHYSIOLOGICAL BASIS OF THE CONDITIONING PROCESS. Jack H. Wilmore y David L. Costill. Human Kinetics Publishers, 1988.

THEORY AND METHODOLOGY OF TRAINING: THE KEY TO ATHLETIC PERFORMANCE. Tudor O. Bompa. Kendall/Hunt Publishing, 1994.

THE OLYMPIC FACTBOOK: A SPECTATOR'S GUIDE TO THE SUMMER GAMES. Dirigido por Rebecca Nelson y Marie J. MacNee. Visible Ink, 1996.

Cementerios nucleares

En Hanford, uno de los complejos nucleares más contaminados del mundo, nadie sabe cuánto costará su limpieza ni el nivel de eficacia que se alcanzará

Glenn Zorpette

El gobierno de Estados Unidos realizará a lo largo de los próximos 75 años, en un vasto desierto al sureste del estado de Washington, el mayor proyecto de obras públicas de la historia del mundo. Cuando esté concluido, tras una inversión de unos 50.000 millones de dólares, no se levantarán sobre sus ruinas ningún centro de lanzamiento de cohetes, ni centrales eléctricas avanzadas, nada que hable de un progreso ilusionante. Apenas si habrá otra cosa que residuos nucleares, millones de toneladas de residuos nucleares, recluidos en una extensa meseta: desde suelos contaminados hasta reactores enteros, sepultados bajo grandes montones de tierra u ocultos en edificaciones anodinas. Y allí se quedarán, durante miles de años probablemente.

Ese es el futuro del recinto de Hanford, el más antiguo complejo de producción de plutonio, perteneciente al Departamento de Energía. De allí salió el plutonio de la bomba que estalló en Nagasaki. Sus 1450 kilómetros cuadrados se han ido degradando desde aquellos días de gloria militar y técnica hasta convertirse en una pesadilla donde se acumulan unas deterioradas y contaminadas instalaciones en las que cada año se gastan, sólo para que sigan siendo estables o seguras, decenas de millones de dólares.

El Departamento de Energía empezó a desactivar y limpiar Hanford en 1989. Según el último recuento, hubo en el complejo unos 14.300 trabajadores contratados y 550 funcionarios. Se calcula que se emprendieron trabajos medioambientales, o habría hecho falta hacerlo, en 1400 lugares distintos. En unos cientos de ellos se habían arrojado deliberadamente residuos nucleares líquidos o sólidos: desde 1944, unos 1300 millones de metros cúbicos de desechos líquidos habrán contaminado el suelo de Hanford.

En los últimos siete años el Departamento de Energía ha gastado 7500 millones de dólares en la limpieza de Hanford. Tiene previsto invertir al menos mil millones de dólares por año durante los cuarenta próximos. Esta limpieza ha despertado un gran interés, y no sólo por las sumas que se manejan. "Es algo totalmente nuevo, no ya industrialmente, sino para la humanidad", dice Roy E. Gephart, jefe de programa de la división de ciencias de la energía y el medio ambiente del Laboratorio Nacional Batelle del Noroeste del Pacífico, instalado en Richland. "A medida que vayamos limpiado ese recinto habrá que ir llegando a difíciles compromisos políticos, sociales y técnicos."

El cuadro

Investigación y Ciencia ha examinado docenas de documentos, algunos no publicados oficialmente aún, e informes recientes, y efectuado numerosas entrevistas con quienes se encargan de la limpieza de Hanford, con los administradores y expertos que trabajan allí y con personas que ocupan puestos clave en el Departamento de Energía y en otros organismos oficiales con sede en Washington. El cuadro que se desprende de esta investigación no es alentador. Además del suelo y del agua contaminados reclaman atención muchas otras causas potenciales de desastres; por ejemplo:

- 177 enormes tanques subterráneos de residuos nucleares de alto nivel, algunos de los cuales tienen fugas o están acumulando calor o gases inflamables.
- Doce toneladas, por lo menos, de plutonio peligroso, que en parte se encuentran en el suelo o de alguna otra forma insegura.
- Cinco gigantescos edificios muy contaminados, donde se extraía el plutonio del combustible nuclear irradiado.
- 2100 toneladas de combustible irradiado que se guardan en estanques; un terremoto podría convertirlos en cubos de basura radiactivos, letales.

Ni un solo aspecto del proyecto de Hanford deja de plantear problemas inquietantes: sobre la idoneidad y eficacia del trabajo que se lleva a cabo, sobre la redacción de los contratos de limpieza, sobre la posibilidad de que un fallo desencadene un desastre radiológico. Con todo, se ha dado un paso importante en los últimos siete años, un acuerdo gracias al cual se han puesto a trabajar juntas las partes con intereses enfrentados que han firmado el estado de Washington, el Departamento de Energía y la Agencia de Protección del Medio Ambiente. Sin embargo, el propio compromiso estampado se ha convertido en una rémora a la hora de planificar y determinar las propiedades, según han descubierto varios estudios.



"Llevamos seis años con esta limpieza, y no hemos pasado todavía de la primera piedra", dice un experto que lleva en Hanford cuatro lustros. "Ni un solo programa —de limpieza de depósitos, de depuración de aguas o de lo que sea— ha durado más de dos años. Carecemos de guión, con las correspondientes inversiones, a un plazo

suficientemente largo para que se avance.”

La herencia de la guerra fría

Por imponente que sea el proyecto de Hanford, constituye sólo una fracción —un quinto más o menos— de un programa del Departamento de Energía encaminado a cerrar buena parte de su sistema de producción de armas nucleares a lo largo del siglo que viene. Los cálculos del coste van de 230.000 millones de dólares a más de medio billón, bastante más que los 375.000 millones, en dólares actuales, que costó la investigación y la construcción de las decenas de miles de armas nucleares montadas en los Estados Unidos y la detonación de las alrededor de 1000 que se ensayaron.

La imprecisión de las estimaciones de tiempo y costes tiene que ver con la falta de acuerdo acerca del nivel de limpieza en que deben quedar los recintos nucleares el remoto y quizá quimérico día en que se los declare rehabilitados oficialmente. “No podrá haber limpieza en el sentido habitual de la palabra, como si se tratara del suelo de la cocina o una planta química”, advierte James D. Werner, director de planificación estratégica y análisis de la Oficina de Gestión Ambiental del Departamento de Energía. “Hablamos de sustancias que no desaparecerán hasta que se desintegren. Podemos confinarlas en barriles, solidificarlas, inmovilizarlas, trasladarlas, pero no hacerlas desaparecer.”

Para saber cómo y por qué se creó semejante complejo hace falta un poco de historia. A partir del proyecto Manhattan, Estados Unidos desarrolló una industria armamentística colosal. Buena parte de la misma se dedicó a la generación de plutonio, elemento básico de las armas nucleares y el tesoro más preciado de la guerra fría. Este metal deriva del uranio, que se procesaba, es decir, se convertía en combustible nuclear, en instalaciones radicadas en los estados de Idaho, Kentucky, Ohio y Tennessee.

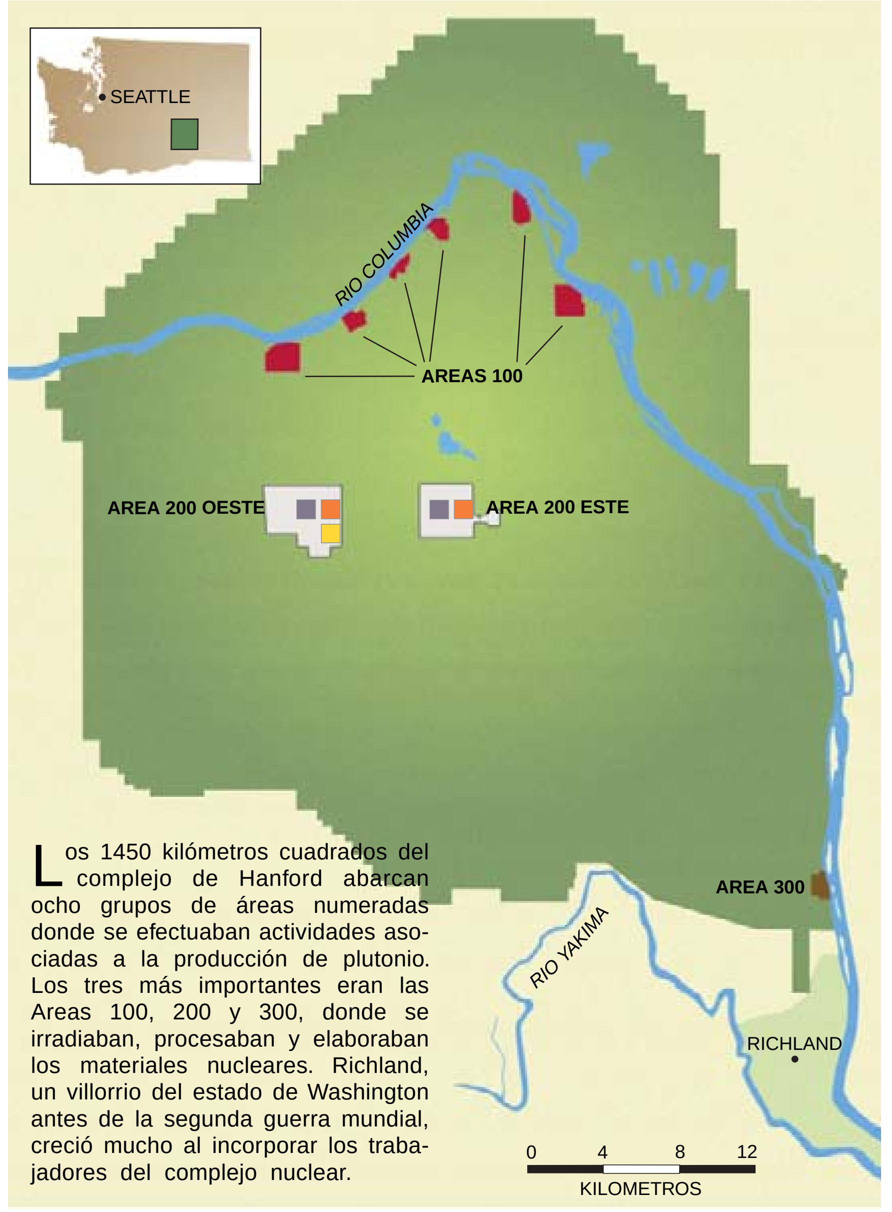
El uranio se irradiaba y trataba químicamente para crear el plutonio en Hanford (estado de Washington) y Aiken (estado de Carolina del Sur). El metal de plutonio se transformaba en componentes de bombas en Rocky Flats (Colorado). Estas piezas se ensamblaban con otros cientos de elementos para construir las bombas completas en la factoría Pantex, instalada en el *Panhandle* de Texas (su entrante entre Nuevo México y Oklahoma).

Con mentalidad de guerra fría lo primordial era la producción. A los organismos responsables de los com-



1. EL DEPOSITO DE RESIDUOS NUCLEARES de alto nivel se encuentra unos tres metros bajo el suelo. Las tomas y tuberías verticales permiten el acceso de instrumentos de control y de extracción de muestras de los residuos. Esos tubos de entrada están sellados con las placas que se ven en la fotografía.

Así se contaminó Hanford



Los 1450 kilómetros cuadrados del complejo de Hanford abarcan ocho grupos de áreas numeradas donde se efectuaban actividades asociadas a la producción de plutonio. Los tres más importantes eran las Areas 100, 200 y 300, donde se irradiaban, procesaban y elaboraban los materiales nucleares. Richland, un villorrio del estado de Washington antes de la segunda guerra mundial, creció mucho al incorporar los trabajadores del complejo nuclear.

REACTORES NUCLEARES
Menos uno, los nueve reactores nucleares de Hanford que creaban el plutonio en sus varillas de combustible tomaban agua del río Columbia; ésta refrigeraba los reactores y se vertía de nuevo en el río. Cuando los revestimientos del combustible se rompían, los elementos radiactivos contaminaban el agua, ésta se desviaba hacia el suelo y retornaba al río. Además, todos los reactores tenían cerca sus propios cementerios; allí se arrojaban los objetos sólidos, algunos sumamente radiactivos.

CAÑONES DE REPROCESAMIENTO
Se construyeron cinco cañones de reprocesamiento (tres en el Area 200 oeste y dos en el Area 200 este) para extraer el plutonio a partir del combustible nuclear irradiado. Se vertieron en la tierra millones de metros cúbicos de aguas residuales contaminadas radiactiva y químicamente, aunque no en un nivel excesivo. En los años cuarenta y principios de los cincuenta se inyectaron, a decenas de metros bajo el suelo, los residuos más intensamente radiactivos de una de las plantas. Al mismo tiempo, dos plantas liberaron grandes cantidades de yodo radiactivo a la atmósfera.

DEPOSITOS DE RESIDUOS DE ALTO NIVEL
Un total de 177 depósitos (91 en el Area 200 este y 86 en el Area 200 oeste) almacenan 210.000 metros cúbicos de residuos nucleares muy radiactivos, producto secundario del reprocesamiento. Se sabe o se sospecha que de 67 de esos tanques se han fugado unos 3700 metros cúbicos de desechos muy radiactivos, que han ido a parar al suelo.

PLANTA DE ACABADO DEL PLUTONIO
De esta planta se bombearon, tierra abajo, residuos que contenían elementos transuránicos, como el plutonio y el americio. También se vertieron muchos solventes industriales y otros contaminantes químicos: tetracloruro de carbono, tributilfosfato, nitruro fluoruro de aluminio y grasa de cerdo (que se usaba de lubricante para cuchillas en el proceso de mecanización a que se sometía el metal de plutonio).

INSTALACIONES EXPERIMENTALES
Hay en el Area 300 un laboratorio de plutonio, instalaciones de fabricación de combustible nuclear y seis reactores de pruebas. Los laboratorios y las instalaciones vertieron a veces en la tierra residuos y líquidos que contenían uranio; los reactores, refrigerantes contaminados.

plejos de fabricación de armas, empezando por la Comisión de Energía Atómica en los años cuarenta, la degradación del medio no les preocupaba en absoluto. (Tampoco parece que al Congreso le importase mucho.) Ni el Departamento de Energía ni sus predecesores estaban sometidos a ningún control externo. Por lo que ahora sabemos, ocultaron las operaciones que se hacían en los complejos y las condiciones en que se ejecutaban, cuando no mintieron sobre ellas.

Esta actitud empezó a cambiar a mediados de los años ochenta. Varias sentencias de los tribunales federales señalaron un cambio de rumbo y establecieron que las leyes y las regulaciones federales y de cada estado eran aplicables a las actividades del Departamento de Energía. (Pese a todo, el propio Departamento de Energía dicta la normativa cuando se trata de materiales nucleares como el uranio y el plutonio.) A finales de los años ochenta, la prensa empezó a publicar noticias sobre la magnitud de la contaminación alcanzada en algunos complejos. Así se intensificaron las presiones sobre el departamento para que cambiase drásticamente sus actividades con repercusión en el medio ambiente y en la seguridad.

Para el Departamento de Energía fue difícil, a veces traumático, convertirse en un organismo sujeto a regulación externa. En el complejo de Rocky Flats, cerca de Denver, donde los contratistas del Departamento sometían a elaboración el plutonio, las acusaciones de que se habían violado las leyes ambientales y deteriorado de forma peligrosa las condiciones provocaron una inspección federal, a la que siguió una querella contra el principal contratista de la planta, Rockwell International. El pleito se zanjó con un acuerdo: Rockwell pagó una multa de 18,5 millones de dólares y se retiraron los cargos. El Departamento de Energía encaró lo inevitable y creó la Oficina de Gestión del Medio Ambiente, ente que este año recibirá 6026 millones de los 16.300 millones de dólares del presupuesto total del Departamento

(aún van 3400 millones de dólares a la fabricación de armas).

Con Hazel R. O'Leary en la secretaría del Departamento se han entreabierto las puertas. Sabemos así que el departamento y sus contratistas generaron cientos de miles de metros cúbicos de residuos muy radiactivos y peligrosos y miles de millones de productos menos radiactivos. El organismo admite ahora que se vertieron sin más cantidades ingentes de líquidos y sólidos en el suelo. La mayoría de los desechos contienen contaminantes tanto radiactivos como químicos.

En algunos vertederos deliberados se hicieron cálculos para determinar cuánto contaminante podría absorber el suelo suprayacente a la capa freática; se suponía que los operarios deberían limitar las descargas al diez por ciento de esa cantidad umbral. A juzgar por los graves problemas que ha habido con las aguas subterráneas en casi todos los complejos del Departamento de Energía, rara vez se procedió de esa forma, o se hizo inadecuadamente. En los últimos años han entrado en funcionamiento plantas de tratamiento de los efluentes líquidos para purificar las descargas antes de que vayan a parar a la tierra.

Hubo otros vertidos accidentales. Casi todos se debieron al descuido: los viejos depósitos de almacenamiento tenían a veces fugas de residuos radiactivos que penetraban en el suelo, y lo mismo pasaba con el agua contaminada de los estanques que contenían combustible nuclear consumido u otros materiales. Se liberaron también millones de curies en forma de materiales radiactivos potencialmente dañinos al aire y a los ríos, en Hanford y en otros recintos, a veces deliberadamente.

Parte del daño provocado permanecerá. Carecemos de técnicas de limpieza adecuadas o no podrán nunca rebajar el nivel de radiación. En Hanford, por ejemplo, una bolsa de agua freática contaminada con tritio, nitratos y otros ocupa una extensión de al menos 250 kilómetros cuadrados y se está filtrando en el río Columbia, que recorre 82 kilómetros del recinto. Es casi imposible separar el tritio, isótopo radiactivo del hidrógeno, del agua. Esa bolsa radiactiva es sólo una de las muchas que hay allí. Entre todos los complejos armamentísticos se habrán contaminado miles de millones de metros cúbicos de suelo, aguas freáticas y superficiales. Son, con sus equivalentes de la que fuera Unión Soviética, los yermos campos de batalla de la guerra fría.

Ciento setenta y siete tanques de pesadilla

El Departamento de Energía se ha centrado sobre todo en la estabilización y depuración de Hanford, constituido en una suerte de campo de pruebas para los demás complejos donde la labor está menos avanzada, entre ellos los de la antigua Unión Soviética. Este año se gastarán en Hanford 1353 millones de dólares del presupuesto de Gestión del Medio Ambiente, la partida mayor.

Pero no da la impresión de adelantarse mucho. Quizá la razón estribe en que la depuración del suelo y del agua contaminados sea una de las tareas menos apremiantes. Urgen más los 177 depósitos de residuos de alto nivel, trabajo que es, a gran distancia de los demás, el mayor, el más complejo y el más caro. Sólo este empeño podría costar 50.000 millones de dólares. Y, sin embargo, hasta hace poco, de los tanques se ocupaban los trabajadores menos especializados de Hanford. Era "una Siberia para los negligentes del complejo", dice Roger F. Bacon, vicepresidente de Westinghouse Hanford Company, responsable de la obra.

Los depósitos almacenan 210.000 metros cúbicos de residuos nucleares radiactivos de alto nivel. La mitad casi de los 450 millones de curies de radiactividad que se acumulan en Hanford reside en esos tanques: una mezcla infernal de líquidos, gases, cienos y pétreos "terrones de sal". Se sabe o se sospecha que en 67 de los 177 depósitos ha habido fugas que han vertido al suelo unos 3700 metros cúbicos de desechos. Hay vigilancia permanente sobre 54 tanques; la razón del control se debe a que en el interior de la mitad de ellos se han formado en alguna ocasión gases inflamables y se ha corrido el riesgo, pequeño, eso sí, de que se produjese una explosión química que liberara la radiación. El Departamento de Energía se gasta 80 millones de dólares al año sólo en la conservación de los depósitos y en mantenerlos seguros.

El contenido de los tanques se generó como subproducto de la separación del plutonio del combustible nuclear consumido. Nada menos que 149, entre ellos los 67 que han experimentado fugas, están formados por paredes simples de acero cubiertas con hormigón armado; los demás tienen paredes dobles, más resistentes a las fugas. Aunque debían almacenar productos con semividas de miles de años, los tanques se diseñaron para durar sólo 25 años; pese a lo cual, no se los dotó de medio alguno para drenar los residuos.

Los primeros depósitos de pared simple se terminaron en 1944. Se supo en 1959 que algunos habían tenido fugas. "Pero siguieron construyéndolos hasta 1964 y no dejaron de introducir en ellos residuos hasta 1980," señala Andrew P. Caputo, del Consejo de Defensa de los Recursos Naturales. Los depósitos contienen desechos procedentes de tres técnicas de reprocesamiento distintas. Se emplearon periódicamente procesos químicos para extraer de ellos isótopos útiles o peligrosos. Cuando alguno tenía fugas, se pasaban los residuos de tanque en tanque —con lo que, inevitablemente, se mezclaban— para evitar los contenedores con escapes.

En consecuencia, nadie sabe con exactitud qué hay en los depósitos. Un conocimiento, sin embargo, que no puede demorarse. Existe un acuerdo legal con el estado de Washington que obliga al gobierno federal a mezclar los desechos con cristal (técnica de vitrificación) a fin de poder retirarlos a un cementerio de residuos nucleares de alto nivel. Pero no podrán vitrificarse mientras se desconozca su composición. Sus ingredientes podrían ser diferentes incluso en partes distintas de un mismo tanque.

El programa de "caracterización de los residuos de los depósitos", cuyo objetivo es especificar qué hay en éstos, se ha convertido en pararrayos de todas las críticas. "Llevan con eso diez años, se han gastado 260 millones de dólares y apenas si todavía pueden tomar muestras a un ritmo razonable", se queja William R. Swick, de la Oficina General de Contabilidad. A la dificultad que entraña tomar muestras en un medio de altísima radiactividad y toxicidad, hay que sumar la multiplicidad de estados físicos y la actividad química que se está operando en los residuos.

Los lingotes mortíferos

Durante 40 años, y procedentes de las instalaciones de reprocesamiento, se llevaron soluciones de nitrato de plutonio a la planta de acabado del recinto, donde se lo convertía en "botones" plomizos y romos, para su posterior mecanización. En Hanford se almacenan once toneladas de plutonio, en gran parte en condiciones estrictas de seguridad dentro de los contenedores de la planta de acabado. Se calcula que



2. LOS “BOTONES” DE PLUTONIO eran el único producto de Hanford. Estaban hechos del isótopo 239 del plutonio. Se enviaban a Colorado, donde se los elaboraba convirtiéndolos en componentes de bombas. Este metal tiene que manejarse en cajas con guantes, porque basta una cantidad ínfima para producir cáncer de pulmón.

quedará, además, tonelada y media de residuos dispersa en los suelos del recinto o en las conducciones y filtros de sus instalaciones.

El plutonio se encuentra en muchas formas distintas en Hanford. Hay rebabas minúsculas; está presente en lodos y en 3500 litros de nitratos y otras soluciones. En la planta de acabado ha empezado la limpieza de los innumerables conductos de aire, filtros y “cajas con guantes” donde se extraía y manejaba el metal. Se está llevando además el plutonio a la planta de acabado desde otros emplazamientos de Hanford para congregarlo todo en un mismo punto. La mayor parte se convertirá para su almacenamiento a largo plazo en óxidos o en otras formas pulverulentas aceptablemente estables. El trabajo resulta lento y costoso, pues el plutonio es sumamente peligroso: 27 microgramos en los pulmones pueden causar un cáncer.

Los trabajadores deben además tener cuidado con la masa crítica del metal, que puede constituirse con sólo 11 kilogramos. Si se deja que llegue a acumularse en un lugar, una reacción de fisión en cadena desprenderá una cascada letal de neutrones y radiación gamma. En la historia norteamericana de las armas nucleares ha habido, que se sepa, ocho sucesos de masa crítica y dos muertes, ambas en Nuevo México, a mediados de los años cuarenta.

En los últimos tiempos ha faltado muy poco para que ocurriesen esas “infracciones de la criticalidad”. A finales de septiembre de 1994 un trabajador, extrayendo el líquido de un depósito de Rocky Flats, dejó cinco litros de solución de plutonio muy concentrada en lo que la Junta de Seguridad de las Instalaciones Nucleares de la Defensa llamó “una geometría potencialmente insegura”. Muy poco faltó también hace varios años en el complejo de Idaho, cuando unas masas de combustible suspendidas en un estanque cayeron al fondo cerca unas de otras. A mediados de los años ochenta se declaró al complejo de Hanford lugar de riesgo en caso de terremoto. Se comprobó que un temblor podría romper las juntas, por donde se escaparían a la atmósfera los compuestos de uranio.

Los planes para hacerse cargo del plutonio retirado —no sólo en Hanford sino también en Rocky Flats, Savannah River y Pantex— tropiezan con la incapacidad del Departamento de Energía para decidir si debería guardarse para un posible uso en el futuro. El Departamento de Energía gasta unos 82 millones de dólares por año en el mantenimiento del plutonio sólo de la planta de acabado de Hanford.

Unos cañones muy caros

Las plantas de reprocesamiento, donde se extraía del combustible irradiado el plutonio antes de enviarlo a la planta de acabado, son otra carga financiera. En Hanford hay cinco, instaladas en unos edificios de hormigón, los *cañones*, en el sentido geográfico de la palabra. El tamaño de algunos es parecido al que tendría el Empire State Building si estuviese tumbado. La radiación que contienen, todos, va de moderada a letal. Las superficies interiores, los filtros de aire y los sistemas de conducciones portan grandes cantidades de elementos radiactivos peligrosos.

En uno de los cañones, la llamada planta B, los filtros de aire pueden haber acumulado hasta 100 millones de curies de cesio y estroncio radiactivos. Ante tanta radiactividad concentrada será dificilísimo demoler el edificio, como exigen los acuerdos entre el gobierno federal y el estado. No se dispone de un cálculo mejor de la radiactividad; es tan alta que “no tenemos instrumentos que la midan con precisión”, admite un experto de Hanford.

Los cañones están muy reforzados, para resistir bombardeos, y los pesados blindajes de sus paredes no dejan escapar la radiación. En estos momentos el mantenimiento y la vigilancia de cada una de las cinco plantas de reprocesamiento cuesta de 35 a 45 millones de dólares al año. Pese a todos los inconvenientes, el Departamento de Energía y la Westinghouse Hanford se proponen descontaminar la planta B y otro cañón, el Purex; esperan dejarlos en un estado que no requiera demasiados cuidados. Los proyectos trianuales pretenden reducir los gastos a uno o dos millones de dólares al año.

Pero seguirá siendo necesario gastar 10 millones de dólares al año en la planta B para conservar la instalación de almacenamiento y encapsulado de residuos. En ella hay unos estanques de agua que enfrían y blindan unas 1900 cápsulas, cada una de las cuales contiene cesio 137 o estroncio 90. Los isótopos se

retiraron hace años de los depósitos de desechos de alto nivel para que éstos fueran menos calientes térmica y radiológicamente.

Aunque los isótopos tienen una semivida de unos treinta años, el nivel de radiación en la superficie de las cápsulas basta para que la dosis que una sola suministra en cuatro segundos sea fatal. La radiación es tan intensa, que su interacción con el agua que rodea los recipientes causa un resplandor azul brillante. Algunos analistas cuestionan que las cápsulas se conserven como están ahora durante mucho tiempo. Para Blush y Heitman, "no hay ningún fundamento científico que le permita a Hanford asegurar que se puede confiar en WESF [la instalación de almacenamiento y encapsulado] para el almacenamiento seguro a largo plazo de esas cápsulas".

Las cápsulas de cesio y estroncio son la punta del iceberg del inventario de residuos radiactivos sólidos de Hanford. El Departamento de Energía y sus contratistas han estado almacenando en estanques de agua que tienen ya 40 años 2100 toneladas de combustible nuclear consumido, en buena parte corroído y liberador de elementos radiactivos en el agua de esas piscinas. Un terremoto podría derramar hasta 9000 metros cúbicos de agua contaminada en el suelo y el río, con lo que la radiación del contorno subiría hasta niveles letales y se dispersarían por el aire finas partículas radiactivas. Podría y ocurrió. De los estanques se filtró abundante agua contaminada en los años setenta y, en menor medida, en 1993. (No se dispersó radiación en la atmósfera porque las fugas fueron lentas, gracias a lo cual se pudo echar más agua de forma que las masas de combustible siguiesen sumergidas.)

El departamento de energía gasta unos 30 millones de dólares al año en mantener las piscinas en ese inquietante estado. Pero está a punto de emprenderse un programa de choque de 700 millones de dólares que transformará el combustible para que pueda almacenarse en seco de forma estable en un embalse provisional sobre unos suelos elevados. Cuando se haya completado, hacia el año 2000, se espera que los costos de mantenimiento caerán a alrededor de un millón de dólares por año. Como pasa con el plutonio y las cápsulas de cesio y de estroncio de Hanford, el destino final del combustible consumido es incierto.

Una nueva "limpieza"

En total, unos 600 millones de dólares del presupuesto anual de Hanford se van en pagar la "hipoteca" de la guerra fría: mantener seguros edificios y plantas, muchos viejos y en mal estado, e impedir que escape de ellos más radiación al aire, al agua y al suelo. Aparte de las grandes sumas necesarias para pagar la hipoteca, hay otras razones más complejas que explican que se haya avanzado tan poco en la limpieza.

El tiempo que los contratistas del Departamento de Energía en Hanford no ocupan en impedir que los riesgos inminentes se conviertan en desastres, lo dedican a congregar contaminantes que se habían retirado inadecuadamente o están cerca de las aguas freáticas o del río; los acumulan con más cuidado y sistemáticamente en la llamada Area 200. Comprende ésta las plantas de reprocesamiento y los depósitos de desechos de alto nivel, y se encuentra en una meseta, a unos 75 metros sobre las aguas subterráneas. En ese llano se concentraba ya alrededor del 70 por ciento de los focos de residuos de Hanford; se trata, pues, de allegar el 30 por ciento restante.

Lugar de destino de miles de toneladas de residuos y de contaminantes del suelo, en el Area 200 se construirán un edificio de almacenamiento, una suerte de cementerio provisional para las 2100 toneladas de combustible consumido estabilizado, y otra instalación para los desechos inmovilizados de alto nivel de los 177 tanques gigantes. Antes del 2070, el Departamento de Energía deberá haber enterrado en el Area 200 ocho de los nueve bloques de reactores (los núcleos de los reactores de producción donde se insertaban las varillas de uranio) y sus pedestales de hormigón.

Cada bloque de reactor y su pedestal comprenden un enorme par de losas muy radiactivas que pesan 15.000 toneladas. El plan director establece que se las acarreará al Area 200 con un vehículo que costará 40 millones de dólares. Se ha cifrado el costo adicional de trasladar los reactores —muchos analistas preferirían enterrarlos *in situ*— en 500 millones de dólares.

Cuando se hayan juntado, estabilizado, guardado en contenedores y situado de nuevo en el Area 200 los cientos de miles de toneladas de residuos, la meseta entera se habrá convertido en un cementerio, una "zona sacrificada" en el lenguaje eufemístico de los políticos. Y probablemente lo seguirá siendo durante miles de años.

¿Hasta qué punto quedará entonces limpio Hanford? El gobierno de los Estados Unidos no tiene todavía unas normas que sirvan para determinar si una limpieza radiológica es completa. El objetivo de devolver Hanford a su condición original —lo que es del todo imposible, como deja meridianamente claro hasta el análisis más rudimentario— ha quedado arrumbado. Como dice Michael V. Berriochoa, portavoz



3. TRANSPORTAR PLUTONIO no es un juego de niños, aunque parezca lo contrario. Gracias al asa, los trabajadores están a más de un metro del contenido del carro mientras tiran de él, lo que minimiza la exposición a la radiación. Además, los soportes cilíndricos del carro separan de manera segura las latas que contienen el material para que, aunque se vuelque, no pueda producirse una reacción nuclear en cadena.



4. ESTOS BIDONES DE DISOLVENTES contaminados se enterraron, sin más, en el suelo hace 35 años; casi todos ellos se han deteriorado y han sufrido fugas. Pero, al contrario de lo que sucede en muchos de los 1400 emplazamientos de residuos de Hanford, la contaminación se mantuvo, hasta cierto punto, confinada.

de Westinghouse Hanford, “no hay bastante dinero en el mundo”.

Aunque la peculiar naturaleza de Hanford desafía a menudo la manera corriente de calibrar la limpieza, hay sobrados indicios de que buena parte de lo realizado ha sido puro derroche. Según el propio Departamento de Energía, los proyectos de limpieza emprendidos entre 1989 y 1994 fueron de un 30 a un 50 por ciento más caros que las iniciativas análogas del sector privado. El método de contratación tradicional del Departamento de Energía, el sistema de “pluscoste” o reembolso de los costes, penaliza la eficacia y el control de los gastos. La Administración reembolsa al contratista todos los gastos que le haya supuesto la realización de un producto o de un servicio. Además, el contratista recibe a modo de beneficio un porcentaje; cuanto más se gaste, mayor será el beneficio. Este sistema se arrastra de los primeros días de la carrera de armamentos, cuando se desconocían los riesgos y los costos, que no dejaban de cambiar.

El Departamento de Energía y Westinghouse Hanford se enfrentaron en 1994 a estos problemas cambiando el tipo de contrato. Adoptaron el basado en el rendimiento, que consiste en dividir las tareas en objetivos más abarcables con resultados concretos. La compensación del contratista depende, total o parcialmente, de cuándo cumpla esos objetivos y de lo bien que lo haga.

El martillo legal

Pero la redacción de los contratos no es, en absoluto, el problema principal de Hanford. El Departamento de Energía, la Agencia de Protección del Medio Ambiente y el estado de Washington firmaron en 1989, por los días de registro de Rocky Flats, un Acuerdo Tripartito minucioso que regula casi todos los aspectos del trabajo medioambiental en el recinto. El Acuerdo, que lista actividades y objetivos concretos y puede sancionar al Departamento de Energía si los incumple, fue el modelo de muchos otros documentos, los llamados acuerdos de cumplimientos, que rigen el trabajo medioambiental en varios recintos del Departamento de Energía. Si se deja aparte el déficit federal, el coste de las obras comprometido en los acuerdos de cumplimientos a efectuar en la limpieza de todos los complejos representa la carga más onerosa que se ha echado a sus espaldas el gobierno de la nación.

Nadie niega que el Acuerdo Tripartito fue un hito a partir del cual el Departamento de Energía y el estado de Washington trabajaron juntos. Como es un documento vinculante, resulta poco probable que el Departamento de Energía —o el Congreso— abandone el complejo de Hanford en 10 o 20 años. Pero cabe que, ocultas por tales logros, se pasen por alto las deficiencias del Acuerdo Tripartito. Cuando se redactó hace siete años, le impuso al Departamento de Energía una selva de regulaciones medioambientales estatales y gubernamentales que se superponían y a veces entraban en contradicción.

Además de las leyes estatales y federales, los contratistas del Departamento tienen que seguir cumpliendo las “órdenes” promulgadas por éste aún vigentes que dictan cómo deben realizarse las obras. Las 466 órdenes, dice Caputo, abogado del Consejo de Defensa de los Recursos Naturales, “puntillosas y reiterativas, pertenecen a otra época”. Además, el departamento y sus contratistas añadieron a finales de los ochenta una forma de supervisión más con la Junta de Seguridad de las Instalaciones Nucleares de la Defensa, un organismo del ejecutivo. Más recientemente, una comisión asesora de Hanford ha unificado la supervisión conjunta. “Nadie ha pretendido jamás aplicar todas esas regulaciones a la vez, no digamos ya en unas instalaciones de ese tenor”, comenta Gephart, del Laboratorio Battelle.

Semejante maraña de normas y supervisiones externas ha abortado la creación de una regulación coherente, racional y basada en el cálculo de los riesgos para el complejo tomado como un todo. Muchas de las prioridades fueron establecidas por los acuerdos de cumplimientos, que fijaron un calendario vinculante, de los proyectos y los resultados. Pero el Departamento de Energía, sus contratistas y el estado llegaron finalmente a la conclusión de que el calendario propuesto en el Acuerdo Tripartito original de Hanford “no podía ser menos realista”, se queja Caputo. Hasta ahora el estado de Washington y el gobierno federal han renegociado el documento cuatro veces, en un intento de acercarlo más a la realidad. Cada renegociación es “un proceso agónico, y se llega a un sinfín de cláusulas obligatorias”, dice Chris Abraham, de la Oficina General de Contabilidad.

El que no haya habido un enfoque coherente a la hora de sentar las prioridades, que abarcase el complejo entero, ha salido caro. No hay problema en Hanford que no se convierta en una prioridad urgente —y objeto de inversiones de cientos de millones de dólares— por razones fundamentalmente políticas. Aún son visibles en Hanford los vestigios de varios proyectos abortados, como los cimientos de una macroinstalación para la vitrificación de residuos de alto nivel y una planta para mezclar los desechos líquidos de bajo nivel con cemento, más las instalaciones anejas donde se habrían guardado los resultantes bloques de mortero.

(Que arrojaron por la borda cientos de millones de dólares.) El cambio constante de las prioridades ha arruinado también los proyectos de desarrollo técnico. “Por desgracia, los ciclos temporales de los cambios de programa han sido mucho más cortos que los ciclos temporales del desarrollo tecnológico”, remacha Billy D. Shipp, del Laboratorio Battelle.

Hay también ejemplos más simples de los fallos del Acuerdo Tripartito. Conforme a las estipulaciones de éste, el Departamento de Energía gasta unos 23 millones de dólares al año en el tratamiento experimental de las aguas freáticas de Hanford. Sin embargo, varios estudios han hallado que las técnicas actuales —variantes todas de un método llamado “bombear y tratar”— resultan inadecuadas. En el mejor de los casos, los procedimientos del tipo “bombear y tratar” sólo podrían mejorar o retener modestamente algunas de las bolsas existentes contaminadas. “Podríamos bombear y tratar las aguas freáticas de Hanford todo el siglo que viene y gastarnos decenas de miles de millones de dólares, y todavía no tendríamos unas aguas freáticas limpias”, explica Gephart.

Hay un proyecto cuyo objeto es cortar la filtración de estroncio en una fuente natural cerca del reactor “N” y el río Columbia. En cumplimiento del Acuerdo Tripartito y las exigencias del estado, Bechtel Hanford, contratista del Departamento de Energía, gasta 4,8 millones de dólares en bombear y tratar el agua de la fuente para retirar el estroncio. En los próximos años Bechtel espera construir una barrera subterránea de un material llamado clinoptilolita, que absorberá y retendrá el estroncio.

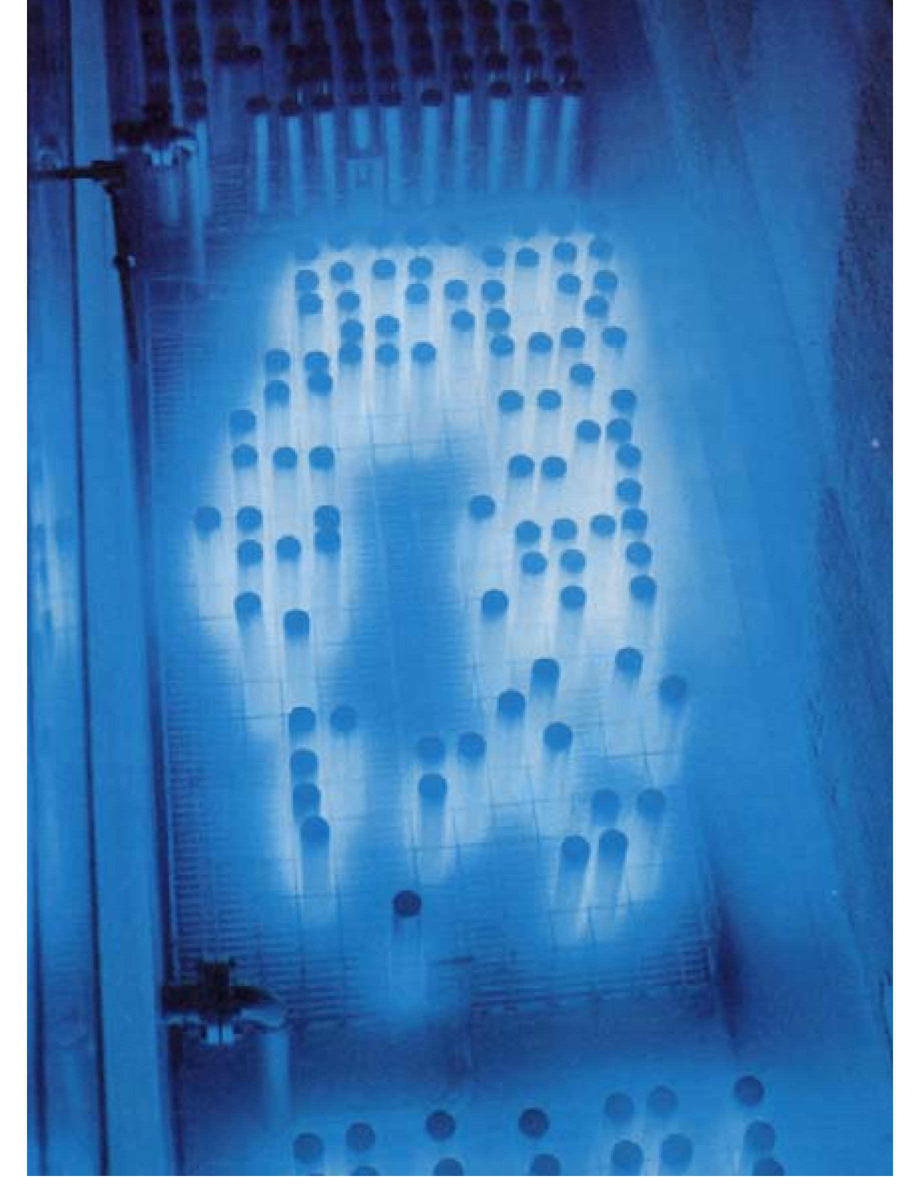
El único propósito de toda esa obra es impedir que llegue al río hasta la mínima cantidad de estroncio: su radiactividad anual, según la última evaluación, es de un cuarto de curie. Para ver en perspectiva esta cantidad, sépase que el Columbia recibe cada año unos 6000 curies de las fuentes naturales de Canadá y el norte de Washington.

5. LOS CAÑONES DE REPROCESAMIENTO eran las instalaciones donde el combustible nuclear irradiado se disolvía en ácido nítrico y se trataba químicamente en sucesivas “cubas de procesamiento” para extraer sus minúsculas cantidades de plutonio. Las losas rectangulares del suelo son bloques que cubren las cubas. Todo el trabajo lo realizaban unas grúas y otras máquinas manejadas por control remoto; así se protegía a los trabajadores de las dosis letales de radiactividad.

Una selva jurisdiccional

Para enredar más las cosas, el Acuerdo Tripartito ha colocado Hanford bajo la jurisdicción de varios estatutos medioambientales; los dos más importantes son la Ley de Recuperación y Conservación de los Recursos (la RCRA) y la Ley Global de Responsabilidad Legal, Compensación y Respuesta Medioambiental (la CERCLA, conocida también como Superfondo). Ambas leyes especifican cuándo hay que limpiar un recinto contaminado. Pero la RCRA, administrada por el estado, se aplica principalmente a las instalaciones donde se trataron, almacenaron o depositaron desechos peligrosos, o donde se sigue haciendo aún. El Superfondo, ejecutado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente, cubre las instalaciones contaminadas que han dejado de estar en funcionamiento, y, a diferencia de la RCRA, se aplica tanto a residuos radiactivos como químicos. Las dos leyes requieren protocolos y procedimientos distintos.

En virtud de la forma en que el Acuerdo Tripartito aplica la normativa a Hanford, cualquier emplazamiento que conste de componentes activos e inactivos, que produzcan o hayan producido residuos peligrosos, queda sujeto *tanto* a la RCRA como al



6. LA RADIACION de las cápsulas con desechos de cesio y estroncio es tan intensa, que su interacción con el agua crea un resplandor que se percibe a simple vista. La radiación en la superficie de los recipientes es altísima: en cuatro segundos se desprende una dosis letal; el agua del estanque blinda de las emanaciones mortales el espacio suprayacente.

Superfondo. Para la Oficina General de Contabilidad, y no sólo para ella, semejante cobertura doble ha dificultado el desarrollo de cientos de proyectos medioambientales. La desactivación y descontaminación de los reactores nucleares del complejo caen en estos bajos momentos bajo las dos leyes. INVESTIGACIÓN Y CIENCIA ha sabido que, para evitar la duplicación, los trabajos se atendrán en unos reactores a la RCRA y en los demás al Superfondo. La misma tarea, efectuada por el mismo contratista, se hará, pues, de dos maneras y tendrá dos expedientes diferentes.

El Acuerdo Tripartito aplica la RCRA y el Superfondo a los 177 depósitos de desechos de alto nivel. La aquiescencia del Departamento de Energía a esta cobertura doble “ha impedido el desarrollo de importantes opciones técnicas en la limpieza de Hanford y ha creado la posibilidad de un incremento potencial de los costes del orden de miles de millones de dólares”, según un informe de enero de 1996 del Consejo Nacional de Investigación. El Departamento de Energía y sus reguladores intentan resolver el problema RCRA-Superfondo desde 1988, sin éxito hasta ahora.

Problemas a la vista

Por serias que sean las dificultades con las que se enfrenta el Departamento de Energía resultan de escasa monta en comparación con las que se avecinan. El Acuerdo Tripartito, por ejemplo, exige que el Departamento vitrifique los residuos de alto nivel de los 177 depósitos. En las instalaciones del río Savannah, en Carolina del Sur, se construyó una gran planta de vitrificación; costó dos mil millones más de lo presupuestado y se terminó seis años después de lo previsto.

Consciente de lo complicado que será convencer al Congreso de que suscriba otra iniciativa por el estilo, pero obligado por el Acuerdo Tripartito a vitrificar los residuos de Hanford, el Departamento de Energía busca ahora una o más empresas privadas que lo hagan. Tendrían que construir y encargarse de la planta, aceptar unas estrictas normas de seguridad y asumir todos los riesgos financieros. El Departamento pagaría los lingotes de cristal terminados, aportando a las firmas —en teoría—un beneficio. A la mayoría de los observadores les gusta la idea, pero se muestran incrédulos: “Uno de los mayores problemas que el Departamento ha tenido es su incapacidad de desviar los riesgos a las empresas privadas, de forma que si hay un gasto imprevisto o sucede algo catastrófico sea la empresa la que sufra las consecuencias”, señala Abraham, de la Oficina General de Contabilidad.

Una vez vitrificados los residuos, el Departamento ha de llevarse los bloques, y parte de los desechos transuránicos de Hanford, para depositarlos en cementerios permanentes de otros estados de la Unión. Esto es lo que desea el estado de Washington y el Acuerdo Tripartito estipula. Pero en el camino que lleva a esa meta se levantan obstáculos extraordinarios. La oposición de los estados ha bloqueado la apertura de un cementerio de desechos transuránicos (que contengan plutonio y otros elementos cuyos números atómicos sean mayores que 92) en Nuevo México y la construcción de uno de residuos de alta actividad bajo el monte Yucca, en Nevada. El Departamento de Energía acaba de informar que el cementerio de Yucca no podrá estar listo antes de 2015; algunos expertos temen que la apertura sólo tendrá lugar decenios después de esa fecha, si es que se produce.

Aun cuando los cementerios entrasen en servicio, es poco probable que pudiesen guardar más que una pequeña fracción de los residuos de Hanford. Procedentes de estas instalaciones habría en el hipotético cementerio de Yucca unos 6000 bloques vitrificados. Pero de los residuos de alto nivel de los depósitos de Hanford saldrían entre 20.000 y 60.000 de esos bloques, según los últimos cálculos del Laboratorio Battelle. Se ha estimado que las cantidades de restos transuránicos de Hanford su-

perarían la capacidad del cementerio transuránico de Nuevo México, y éste, como Yucca, habría de recibir además los residuos de docenas de otras fuentes.

La vitrificación es uno de los problemas cruciales cuya solución ha sido imposible por culpa de las relaciones tirantes entre el estado de Washington y el departamento de Estado. ¿Habría que vitrificar todos los desechos de los tanques? ¿Habría que derribar los edificios de procesamiento? ¿Habría que trasladar los bloques y pedestales de 15.000 toneladas de peso al Area 200 y enterrarlos allí? ¿Habría que gastar cientos de millones de dólares en bombear y tratar unas aguas freáticas que nunca quedarán limpias? Son preguntas que se formulan los analistas y, en privado, los responsables del complejo.

El Acuerdo Tripartito exige que estas preguntas se respondan con un sí, pese a los análisis técnicos rigurosos que han argüido lo contrario. Algunos estudios, por ejemplo, han aconsejado que se conviertan los gigantescos edificios de reprocesamiento en cementerios de residuos de bajo nivel. Pero el Acuerdo descarta esa posibilidad. Otros problemas aguardan también su solución, entre ellos el de encontrar un destino final del plutonio y de las muchas toneladas de combustible nuclear consumido en Hanford.

Como siempre, será el dinero el que al final zanje las cuestiones. “El coste de una gran planta de vitrificación, eso sí que es dinero”, dice el presidente de Westinghouse Hanford, LaMar Trego. “Tendrá, pues, que competir con la eliminación del plutonio, con Medicare [el seguro público de salud], con todo. El legislativo es consciente de que, al final, deberá abordar esa patata caliente”, apostilla.

Pero ese final se acerca a pasos agigantados. Los recortes presupuestarios han alcanzado al Departamento de Energía. Un estudio, no publicado, de Battelle examina las estrategias de limpieza a la luz de una disminución esperada de la financiación anual “desde los niveles actuales [alrededor de 1400 millones de dólares] a 1050 millones en el año fiscal de 1998”. Tras ese año, la financiación se mantendría más o menos constante durante los 40 años siguientes. El informe de Battelle halló que “para satisfacer los actuales compromisos y calendarios con el presupuesto proyectado de 1050 millones, habría que conseguir inmediatamente una reducción del 50 por ciento en el coste de la limpieza y mantenerla”.

Dado lo improbable que es que se recorte el precio de la limpieza tanto y dado, sobre todo, el carácter vinculante de los acuerdos de cumplimientos, los Estados Unidos habrán de reconsiderar sus prioridades nacionales. Por ejemplo, los 6000 millones de dólares que el Departamento de Defensa gastará este año en conservar, estabilizar y limpiar sus complejos de armamento se quedan en nada comparados con otras partidas. Hace años que acabó la guerra fría, pero Estados Unidos gastará éste alrededor de 28.000 millones de dólares sólo en servicios de inteligencia, 8000 de ellos en satélites de reconocimiento y escucha y en programas asociados a ellos. El presupuesto militar del año en curso, cifrado en 270.000 millones de dólares, viene a ser el coste previsto de todos los proyectos de gestión medioambiental del Departamento de Energía a lo largo de los próximos cincuenta años.

“Sé que es necesario recortar los programas del gobierno y sacarles mayor partido, pero escatimarle la calderilla al presupuesto de limpieza del Departamento de Energía no hará más que aumentar el déficit a largo plazo”, dice John Glenn, senador por Ohio en cuyo estado hay muchas instalaciones del Departamento. “Sobre el papel puede que parezca que está bien, pero sólo servirá para posponer el día que haya que rendir cuentas. Si no abordamos ese problema ahora, dejaremos a las generaciones futuras una pesada factura que será a la vez un desastre medioambiental y presupuestario.”

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ON THE HOME FRONT: THE COLD WAR LEGACY OF THE HANFORD NUCLEAR SITE. Michele S. Gerber. University of Nebraska Press, 1992.

HANFORD TANK CLEAN UP: A GUIDE TO UNDERSTANDING THE TECHNICAL ISSUES. Roy E. Gephart y Regina E. Lundgren. Informe técnico PNL-10773, 1995. Puede solicitarse al Pacific Northwest Laboratory.

IMPROVING THE ENVIRONMENT: AN EVALUATION OF THE DOE’S ENVIRONMENTAL MANAGEMENT PROGRAM. National Research Council, 1995.

TRAIN WRECK ALONG THE RIVER OF MONEY: AN EVALUATION OF THE HANFORD CLEANUP. Steven M. Blush y Thomas H. Heitman. Informe para el Comité de Energía y Recursos Naturales del Senado de los EE.UU., marzo 1995.

Taller y laboratorio

Shawn Carlson

Detección de ondas electromagnéticas naturales

El 17 de octubre de 1989 iba a ser un día excepcional para el béisbol en la zona de la Bahía. Por primera vez, los rivales de uno y otro lado de la ensenada, los Gigantes de San Francisco y los Atléticos de Oakland, se preparaban para disputar su partido de la Serie Mundial. Como millones de otros habitantes de San Francisco, acababa de instalarme para ver el juego por la televisión cuando, de repente, algo nos sobrecogió con la misma fría crueldad que un tren al arrollar un obstáculo. La casa entera se puso a dar violentos bandazos y a bambolearse, como sacudida sobre las crestas de olas de tres metros. No había que ser californiano para darse inmediata cuenta de que aquel terremoto no era uno de tantos.

La ciencia no tardó en añadir una curiosa nota apendicular a la destrucción sísmica de Loma Prieta. Anthony C. Fraser-Smith, profesor de física del aire de la Universidad de Stanford, publicó un informe fascinante. Según Fraser-Smith, la falla de Hayward, causante del terremoto, nos había ya avisado. Casi desde un mes antes de que empezara a deslizarse y continuara hasta producir el temblor, había estado emitiendo energía electromagnética de larguísima longitud de onda. Tres horas antes de que empezara la devastación, los detectores de Fraser-Smith estaban saturados con más de 300 veces el ruido de fondo normal. El 17 de junio de 1995 se observó una sobrecarga parecida sólo 40 minutos antes de que un temblor de magnitud 6,9 arrasara la ciudad japonesa de Kobe.

La idea de que los seísmos podrían ir precedidos de ondas electromagnéticas de baja frecuencia es polémica. No todos los terremotos liberan señales electromagnéticas indicadoras antes de desencadenarse, y numerosos investigadores consideran que los datos carecen de significación estadística.

Nuestros aficionados podrían contribuir al debate con el detector fácil-de-construir que aquí se describe. Si es cierto que algunos terremotos van precedidos de ondas electromagnéticas de baja frecuencia, este dispositivo las detectará. Es, por supuesto, un complemento al sismómetro descrito el mes pasado. Juntos forman una estación sismológica más refinada que la de la mayoría de las profesionales.

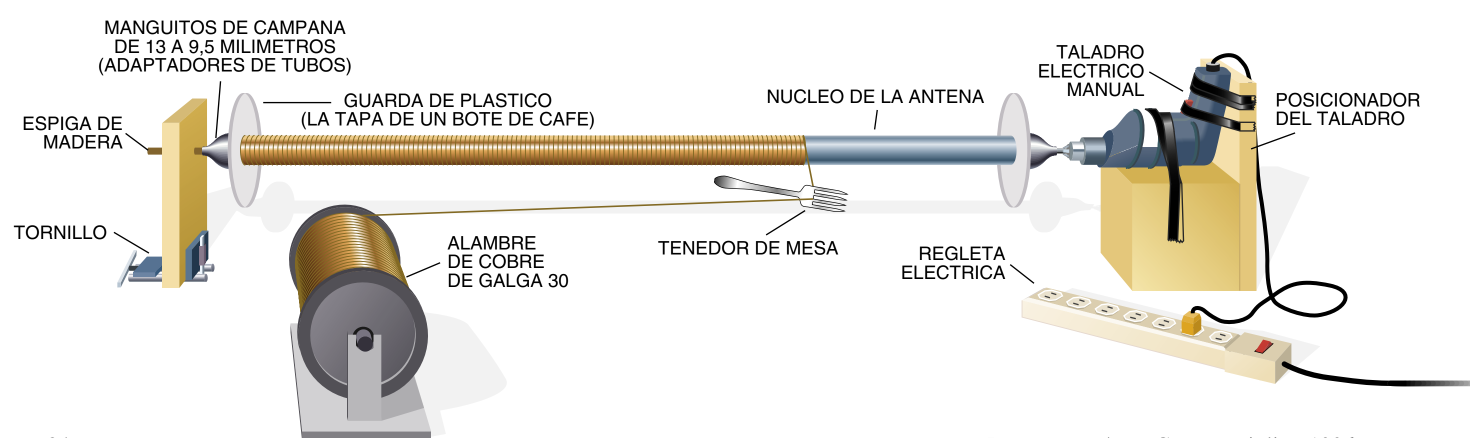
Además, este detector le permitirá al lector investigar otras fuentes de radioondas naturales. Sobre la superficie de la Tierra se abaten del orden de 100 rayos cada segundo. Muchas de las ondas asociadas a las tormentas (cuya inmensa mayoría tienen lugar cerca del ecuador) viajan alrededor del globo rebotando en la ionosfera. Con este detector, podremos registrar las señales; los datos tomados durante un período prolongado pueden revelar de qué modo varía la actividad tormentosa a través de los meses. El viento solar, al chocar con la atmósfera, es también un aceptable tema de estudio.

Las ondas electromagnéticas debidas a todos esos fenómenos son increíblemente largas. Algunas se extienden tres millones de kilómetros entre crestas (casi diez veces la distancia entre la Tierra y la Luna). Pese a su tamaño desmedido, siguen siendo no más que radioseñales y, por ello, puede captarlas una radio adecuadamente diseñada sintonizada a la banda de frecuencia conveniente (de 0,1 a unos 20 hertz).

Tal como sugiere su nombre, una onda electromagnética posee una componente eléctrica y una componente magnética. Para captar el campo eléctrico, al modo de las radios clásicas, habitualmente necesitamos una antena cuya longitud sea al menos un cuarto de la longitud de onda; lo que no es factible cuando ésta es de un millón de kilómetros. Por suerte, la componente magnética, que varía más lentamente, puede detectarse sin tanta dificultad dado que, según la ley de la inducción de Faraday, todo campo magnético variable induce una tensión eléctrica en un bucle de alambre.

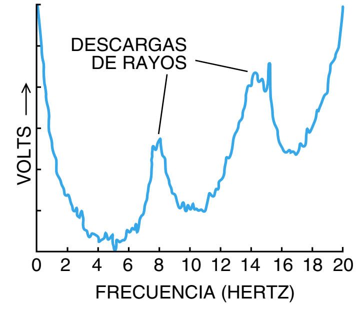
La antena aquí descrita es, por tanto, un solenoide, o sea, una bobina de alambre arrollado en torno a un núcleo largo. Consta éste de una varilla metálica de unos 13 milímetros de diámetro por 60 centímetros de largo sobre el que se arrollan al menos 50.000 vueltas de alambre de cobre de la galga 30.

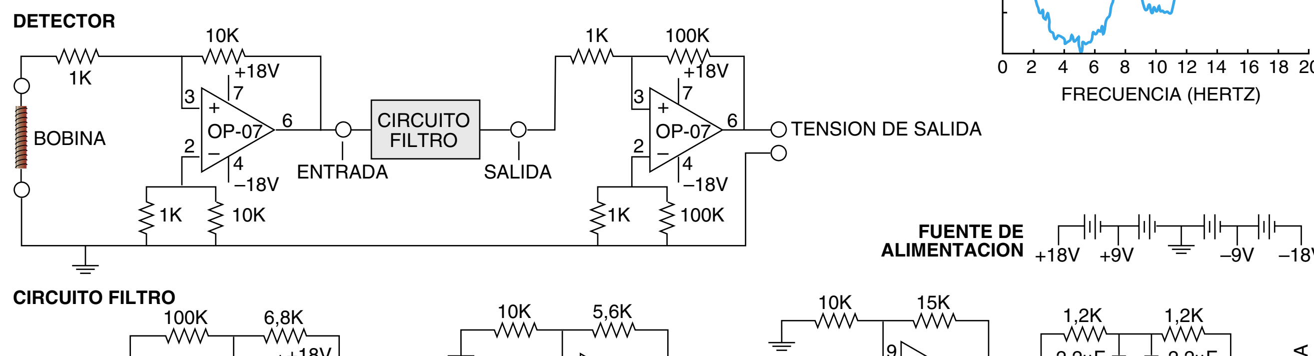
El rebar, una varilla de hierro que puede obtenerse en cualquier almacén de artículos de construcción,

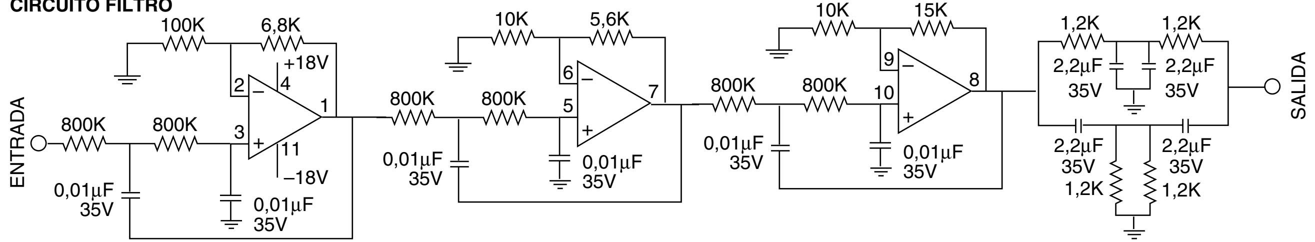


1. Para construir una antena que capte ondas electromagnéticas podemos arrollar alambre de cobre alrededor de una varilla metálica. El taladro eléctrico, con el gatillo trincado con cinta adhesiva, está controlado por la regleta eléctrica

2. Los circuitos que amplifican las señales de antena incluyen un filtro que requiere tres de los cuatro amplificadores operacionales contenidos en un microcircuito OP-47OY (abajo). *La representación gráfica de la energía detectada a distintas frecuencias* (derecha) *puede mostrar picos creados por descargas de rayos lejanos. Los terremotos producen ondas en torno a los cuatro hertz*







es barato y adecuado como núcleo. Ciertas aleaciones de hierro, níquel y molibdeno dan, sin embargo, resultados mucho mejores. Por ejemplo, el Mu-metal y el HyMu 80 poseen unas características magnéticas perfectas y las antenas construidas con ellos son veinte veces más sensibles que las de rebar. Un cuidadoso recocido de estas varillas en un horno de vacío puede multiplicar por diez su rendimiento, pero eso le costará dinero. Scientific Allos, de Westerley en Rhode Island, vende núcleos adecuados a nuestro proyecto por unas 13.000 pesetas; este precio se dobla si quiere piezas recocidas.

Si no tiene a mano un taller de reparación de motores eléctricos que le bobine el solenoide, constrúyase usted uno empleando el montaje que se muestra en la figura 1. Un núcleo de 13 milímetros de diámetro es demasiado ancho para que pueda asirlo la mayoría de los portabrocas de los taladros eléctricos manuales, por lo que necesitará manguitos de campana, que son adaptadores para conectar tubos de diámetros diferentes. Estos, además, proporcionan un modo sencillo para apoyar el otro extremo del núcleo que rota.

Para que el alambre no resbale saliéndose del núcleo, tendrá que obturar los extremos. Abra un orificio de 13 milímetros de diámetro en dos tapas de latas de café. Deslícelas por la varilla y fíjelas con epoxia de modo que sujeten los extremos del arrollamiento. Empleando como guía las púas de un tenedor de mesa, arrolle el alambre en espiras a tope. Cuando haya terminado de bobinar (unas 20 capas), recorte las tapas con cuidado para dejarlas a ras del arrollamiento.

Podemos estimar el número de espiras del arrollamiento si sabemos la velocidad de rotación del portabrocas y la multiplicamos por el tiempo que estuvo funcionando el taladro. Con un poco de práctica, podremos arrollar

Calibre su antena

Debe determinarse la relación entre una onda electromagnética oscilante y la tensión eléctrica que el sistema genera cuando éste detecta la onda. Elija un tubo de plástico de 75 cm de largo y lo bastante ancho para que se deslice fácilmente sobre la antena. Envuélvalo con 100 vueltas de alambre de cobre y luego conecte ese alambre a un generador de señales a través de una resistencia de 100 ohm. Si no posee un generador de señales, puede consultar *Build Your Own Low-Cost Signal Generator*, de Delton T. Horn (TAB Books, 1994).

Centre la antena dentro del tubo y ajuste el generador de señales para que produzca una onda senoidal de 10 hertz. La sobrecorriente transitoria en el conductor de cobre crea un campo magnético oscilante que la bobina detectará. La intensidad máxima del campo magnético se calcula con la fórmula

$$B = 0{,}89 \times 4\pi \times 10^{-7}(N/L)(V/R) = 1{,}12 \times 10^{-6}(N/L)(V/R)$$

donde B es la máxima intensidad del campo magnético, en teslas, N es el números de espiras del tubo, L es la distancia en metros entre la primera y la última espira, V es la tensión aplicada máxima, en volts, y R es la resistencia en ohms. Represente luego B en función de la tensión de señal que se mide de la antena.

Para descubrir la señal más pequeña detectable a 10 hertz, tendrá que repetir el procedimiento, sustituyendo la resistencia de 100 ohms por resistencia de un kilohm, luego 10 kilohms e incluso 100 kilohms. Como la bobina es menos sensible a las frecuencias más bajas, también tendrá que rehacer las mediciones con el generador de señales ajustado a un hertz y luego a 0,1 hertz. Con estos datos, podrá establecer una relación entre la tensión de señal y la frecuencia, en hertz, de las ondas electromagnéticas.

10.000 vueltas por hora. Cada bobina, una vez acabada, encapsúlela en un tubo de plástico para protegerla de los elementos.

Estas antenas son fuertemente direccionales. Si su presupuesto alcanza sólo para una bobina, móntela verticalmente para buscar precursores sísmicos y horizontalmente, con el eje en dirección este-oeste, para detectar ondas procedentes de tormentas lejanas. Con dos bobinas, monte una verticalmente y la otra en dirección este-oeste. Para que la cobertura sea completa, añada una tercera bobina alineada con el eje norte-sur. Estas antenas son tan sensibles, que detectan el paso de vehículos hasta 30 metros de distancia, por lo que trate de instalarlas como mínimo a esa distancia de carreteras o maquinaria.

Para amplificar la señal, el circuito emplea dos amplificadores operacionales de bajo ruido y un circuito filtro para eliminar el ruido radioeléctrico de origen humano. Si dispone de una interfaz analógico-digital, podrá leer directamente los datos en el ordenador de su casa, pero sitúe éste por lo menos a 30 metros para que su campo magnético no interfiera con la antena. Con un ordenador, puede identificar cada fuente aplicando un pequeño truco matemático conocido como transformación de Fourier rápida (TFR). En esta labor le pueden auxiliar muchos paquetes informáticos de análisis de datos. El gráfico de la figura 2 muestra la TFR de una archivo de datos en que la salida se grabó 30 veces cada segundo sin parar durante 24 horas. El pico de Schumann, creado por rayos al descargar a miles de kilómetros de distancia, se percibe con nitidez a unos ocho hertz, junto con una componente secundaria cercana a los 15 hertz. Las ondas sísmicas parecen manifestarse en torno a los cuatro hertz.

Si no dispone de ordenador, necesitará un registrador de banda. En el sistema entra energía procedente de fuentes diversas a frecuencias distintas. Entonces, si emplea un registrador de banda, sólo podrá medir el total sin que pueda desentrañar cuánta energía procede de cada frecuencia.

La norteamericana Sociedad de Aficionados a la Ciencia está organizando una red de observadores aficionados que contribuyan a nuestro conocimiento de las radioseñales naturales. Ofrece estaciones detectoras completas y preparadas para enchufar a su ordenador personal. Sus señas son: Society for Amateur Scientists, 4591 D Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Las esculturas de Alan St. George

Alan St. George es un arquitecto retirado de origen británico. Vive en Portugal y se dedica a la creación de esculturas matemáticas. Me tropecé con su trabajo por vez primera al ver el catálogo de su exposición titulada *La forma del número*, que abrió en Lisboa en diciembre de 1995. Uno de los muchos temas de que St. George se vale es el de las variaciones fractales o espirales de sólidos regulares. Sus originales están construidos con láminas acrílicas o de metal, pero en su mayoría son reproducibles utilizando solamente cartulina o bloques de madera, o, para quienes prefieren la escultura virtual, mediante gráficos informáticos. Los principios subyacentes se prestan a libre exploración para producir variaciones exclusivas.

Euclides, en sus *Elementos*, demostró que existen cinco y solamente cinco sólidos cuyas caras sean polígonos regulares dispuestos de idéntica forma en cada uno de sus vértices. Tales sólidos —el tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro— están formados por cuatro triángulos, seis cuadrados, ocho triángulos, doce pentágonos y veinte triángulos, respectivamente. Para crear esculturas fractales, St. George comienza con uno de estos sólidos y va pegando en sus caras una serie de sólidos cada vez menores, con lo que el resultado parece ser un sólido regular completamente diferente.

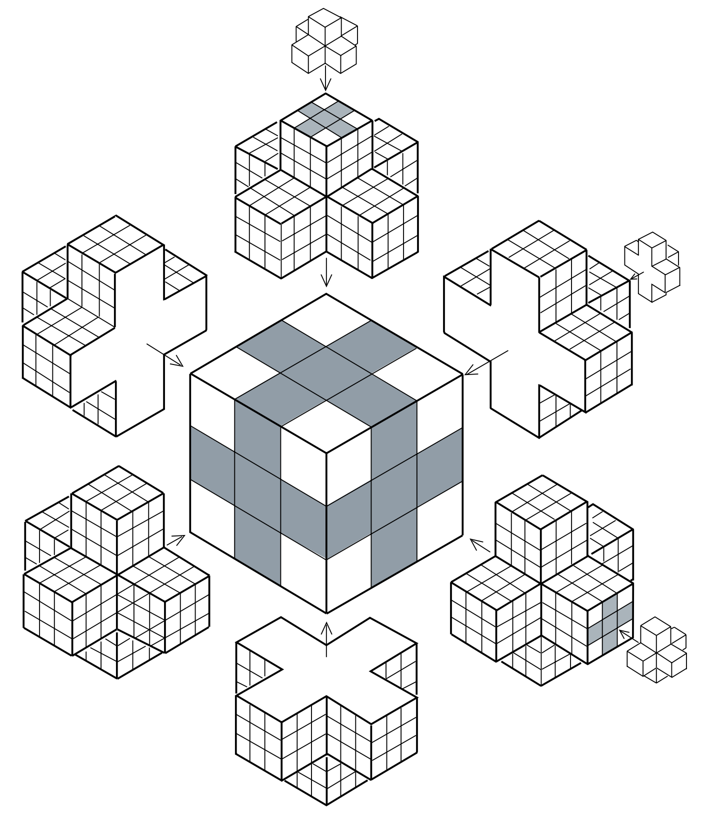
Por ejemplo, para convertir un cubo en un octaedro fractal, se empieza con un solo cubo y se divide cada cara en nueve cuadrados iguales, haciéndolo parecer un cubo de Rubik. A continuación se construye una unidad en forma de cruz con seis cubos pequeños, cuyas caras son del tamaño de aquellos cuadrados. Cinco de estos cubos menores se disponen en cruz griega, mientras que el sexto se asienta sobre el cubo central, formando una especie de pirámide escalonada. Péguese una de tales unidades sobre cada una de las seis caras del cubo original; enseguida, cada una de las caritas cuadradas de la estructura resultante se subdivide en nueve subcuadrados más pequeños aún, sobre los cuales se pegan copias más reducidas todavía de la unidad piramidal escalonada.

Es probable que el lector no quiera continuar con el proceso. El cubo original tiene seis caras, por lo que el primer estadio requiere 36 cubos más pequeños, agrupados en seis unidades piramidales. Cada unidad crea 21 caras cuadradas nuevas, dejando al mismo tiempo sin recubrir cuatro de las subdivisiones de la cara original. Por tanto, cada cara del cubo de partida se convierte en 25 superficies menores. El objeto resultante tiene $25 \times 6 = 150$ superficies cuadradas. Se podría pensar que en el estadio siguiente habría que pegar $6 \times 150 = 900$ unidades más pequeñas aún, pero algunas piezas se superponen y, de acuerdo con el plan fractal, solamente se necesitan 708.

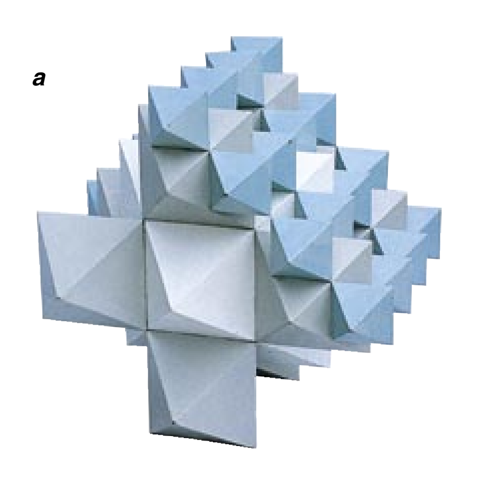
También es posible fractalizar un octaedro y llegar a un tetraedro. En este caso, una cara triangular del octaedro original se subdivide en cuatro triángulos equiláteros iguales; al triángulo central se le adhiere un octaedro de tamaño mitad que el dado. Se hace lo mismo en caras alternas del octaedro, iterándose el proceso varias veces. Si adherimos el pequeño octaedro a todas las caras, en vez de hacerlo en caras alternas, resulta un cubo. De hecho, las esculturas de St. George fractalizan el tetraedro, el cubo o el octaedro y lo convierten en cualquiera de esos tres sólidos.

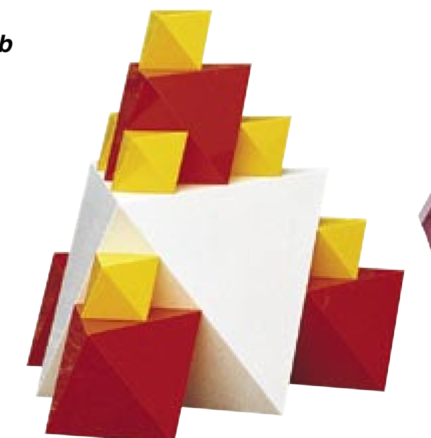
No son fáciles las fractalizaciones con dodecaedros, porque una cara pentagonal no se subdivide en polígonos regulares más pequeños. El método sí es aplicable al icosaedro; sin embargo, los resultados no se asemejan a otros sólidos regulares. Cabe atribuir este problema a la geometría pentagonal del icosaedro, sólido en el cual cada vértice está rodeado por cinco caras.

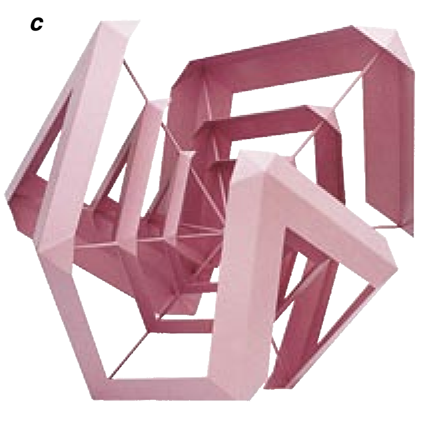
El territorio, no obstante, está plenamente abierto para quien desee explorarlo. Las ideas anteriores podrían generalizarse a sólidos “semirregulares”, cuyas caras están formadas por varias clases distintas de polígonos regulares. La manera más sencilla de construir la mayoría de estas esculturas consiste en ensamblar en cartulina los poliedros componentes y pegarlos entre sí. Una simple “plantilla”, como una pieza de cartón perforada en los

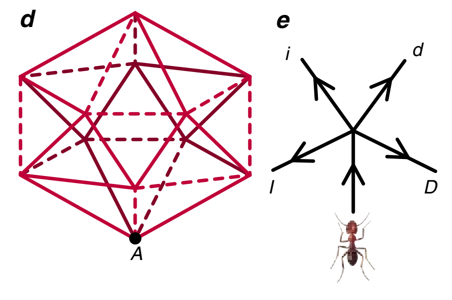


1. Se puede crear un octaedro a partir de un cubo, adosando a éste cubos menores en pasos fractales

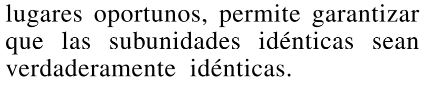








2. El cubo esculpido (a) *y el tetraedro* (b) *fueron creados por Alan St. George a partir de un octaedro. "Espiral 9"* (c) *hace ver un icosaedro* (d) *si lo recorriera una hormiga que iniciara su periplo en el vértice señalado A. La hormiga sigue un camino especificado* (líneas de trazos). *En* (e) *están señaladas las distintas opciones de que dispone la hormiga al llegar a cada vértice*



lugares oportunos, permite garantizar que las subunidades idénticas sean verdaderamente idénticas.

Las espirales de St. George se basan en principios geométricos no menos sencillos, pero su construcción es más intrincada y requiere algunos tanteos. Describiré una de las espirales más elaboradas, fundada en el icosaedro.

La construcción se basa en un circuito cerrado, geométricamente regular, que corre por las aristas del icosaedro y visita cada vértice una y exactamente una vez. Imagine el lector una hormiga que utilizase a modo de carreteras los lados de una red. Al acercarse a un nuevo vértice, la hormiga puede elegir entre cualquiera de las cinco carreteras que allí convergen. Puede dar marcha atrás y regresar por el mismo lado, puede girar mucho a la derecha, hacerlo ligeramente, desviarse ligeramente hacia la izquierda o hacerlo mucho. Simbolicemos estas últimas cuatro opciones con las letras *D*, *d*, *i*, *I* (la marcha atrás no hará falta). Después, moviéndose hacia arriba desde el punto marcado *A*, la hormiga describe un circuito prescrito por la secuencia de giros *DiIdDiIdDiId*. Fijémonos en que la secuencia *DiId* se repite tres veces, lo que revela una pauta obvia.

Por razones estéticas, St. George utiliza en la construcción el famoso "número áureo," $\varphi = (1 + \sqrt{5})/2 = 1{,}618034$. Posee este número múltiples propiedades armónicas; por ejemplo $1/\varphi = \varphi - 1$; $\varphi^2 = \varphi + 1$; y así sucesivamente. Empleando este número, tan querido por los antiguos griegos, se obtiene una estructura de proporciones agradables.

El icosaedro espiral se construye a partir de una serie de "patas" que corresponden a las 12 aristas del recorrido de la hormiga. Cada pata está unida a la anterior y corre paralela a una arista. Pero las patas sucesivas presentan longitudes diferentes, teniendo cada una $\varphi^{1/12} = 1{,}040916$ veces la longitud de su predecesora. ¿A qué obedece la elección de este extraño número? La razón es que tras haber añadido 12 lados a uno dado, el último de ellos corre paralelamente al original, habiendo crecido su tamaño en un factor de $(\varphi^{1/12})^{12} = \varphi$.

Para construir un modelo de esta espiral se debe calcular primero una



Acuse de recibo

"El principio antropomúrfico" [febrero de 1996] ha merecido un volumen de comentarios sin precedente, amén de otras versiones del origen de la 'ley de Murphy' y no pocas objeciones a ella. David C. Carson, de la Universidad Femenina de Mississippi, da cuenta de una serie de experimentos realizados por un grupo de docentes y discentes, en los cuales una tostada fue (*a*) lanzada al azar desde la altura de la cintura, (*b*) empujada y dejada caer desde el borde de una mesa y (*c*) dejada caer desde lo alto de una escalera de aluminio de 3 metros. En los casos primero y último, la frecuencia observada con que la tostada caía del lado de la mantequilla fue del 47 y el 48 %, respectivamente, pero en el segundo lo fue del 78 %. ¡Gratificante!

Carlo Séquin, de la Universidad de California en Berkeley, señaló que el problema no tiene su fuente en el divino diseño del universo, sino en la "Comisión Estadounidense de Normalización Dimensional de Tostadas", obvia responsable de haber decretado que las tostadas sean

lista de potencias de $\varphi^{1/12}$ con el fin de hallar las longitudes de los lados sucesivos. Los 25 primeros números de la lista (con precisión de dos cifras decimales) son 1,00; 1,04; 1,08; 1,13; 1,17; 1,22; 1,27; 1,32; 1,38; 1,43; 1,49; 1,55; 1,62 = φ; 1,68; 1,75; 1,82; 1,90; 1,98; 2,06; 2,14; 2,23; 2,32; 2,41; 2,52; 2,62 = 1 + φ. Se empieza con un lado de (por ejemplo) 5 centímetros y se va multiplicando esta longitud por los números de la lista.

La manera más sencilla de construir la espiral consiste en comenzar con tiras de cartulina, con cada tira doblada a lo largo, por la mitad. Los extremos se cortan para crear perfiles "en punta de flecha", con ángulos de 60 grados a cada lado de la doblez. En los vértices donde concurran dos patas, se pegan los lados adyacentes de las puntas de flecha y se insertan dos pequeños triángulos equiláteros.

Para garantizar la rigidez de la construcción resultante es preciso asegurarse de que las cinco piezas triangulares de cartulina que concurren en cada vértice tengan la misma disposición espacial que las cinco caras de una pirámide pentagonal. Una forma de lograrlo es adosar una pequeña pirámide rígida a cada vértice, cerrada por su base pentagonal. Harán falta cierto número de soportes y las inevitables inexactitudes obligarán a ciertos ajustes. Una vez resueltos estos problemas de diseño —tarea grata, aunque larga, que dejo al cuidado del lector— se tendrá una elegante escultura tridimensional que embellecerá la morada de los lacerados por la pasión matemática.

de tamaño erróneo. John S. Steadman, del colegio universitario de St. John, aportó convincentes argumentos para la tesis de que "no sólo es la ley de Murphy una profunda consecuencia de las leyes de la naturaleza, sino que las leyes de la naturaleza son una profunda consecuencia de las leyes de Murphy". Por ejemplo, el Segundo Principio de la Termodinámica enuncia que "las acciones tienen consecuencias irreversibles", que no es sino la ley de Murphy dotada de dimensión moral, mientras que la física cuántica es mera versión pesimista de la ley de: "Si algo puede ir mal, ya ha ido mal."

Libros

Angel Romo y Luis Alonso

Patrimonio nacional

Flora

Història natural de l'arxipièlag de Cabrera. Dirigido por J. A. Alcover, E. Ballesteros y J. J. Fornos. Editorial Moll-CSIC; 1993.

Els sistemes naturals dels aiguamolls de l'Empordà. Dirigido por J. Gosálbez, J. Serra y E. Velasco. Institució Catalana d'Història Natural; Barcelona, 1994.

Estudio ecológico de la laurisilva canaria, por J. M. Gandullo. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; Madrid, 1991.

Flora de Castilla y León. A. Kraus y A. Mª. González-Garzo. Junta de Castilla y León; Valladolid, 1992.

Uno de los primeros objetivos de la biología de organismos y sistemas es conocer nuestro entorno más inmediato. En esta línea se inscribe el inventario de los recursos naturales, el estudio de la biodiversidad. Empeño en que se han visto comprometidos generaciones enteras de naturalistas, desde el siglo XVIII hasta nuestros días, en que abundan los autores de catálogos de flora y fauna.

Por lo común, tales estudios de la biodiversidad suelen ceñirse a determinados ámbitos de la historia natural, que nos permiten obtener una idea bastante aproximada de las especies que comparten con nosotros el territorio y de la distribución que presentan. Pese a todo, el proceso de inventario del patrimonio nacional, que comenzó bastante después que lo iniciaran otros países europeos, no está cerrado.

La visión descriptiva y analítica que representa un inventario ha ido evolucionando con el tiempo. Importa saber lo que se tiene, pero también lo es saber por qué está allí y no en otro lugar, cuál es su ciclo vital, requerimientos ecológicos, estrategias de polinización, reproducción y diseminación. De un tiempo a esta parte se exige ya una aproximación de conjunto, de especies y comunidades, con un enfoque pluridisciplinar. El estudio pluridisciplinar del archipiélago de Cabrera es un buen ejemplo de estudio de un área geográfica reducida, en este caso islotes e islas de pequeño tamaño, en el que han intervenido más de 60 expertos. Las islas y muy especialmente los archipiélagos son laboratorios naturales donde los procesos de especiación se pueden seguir mejor. Cabrera es un archipiélago cercano al litoral de Mallorca, aunque con rasgos peculiares que lo distinguen de ésta.

La obra nos ofrece la historia natural de las islas. A la descripción del entorno geológico, sigue la de los seres vivos y, por fin, las comunidades vegetales. Se acompañan mapas temáticos de geología, geomorfología y de vegetación. Entre las novedades destacan las referencias a tres nuevas especies de isópodos marinos. Pero faltan los aspectos funcionales y dinámicos de los inventarios. En el caso de las plantas vasculares no hubiese estado de más señalar las diferencias significativas entre el inventario realizado en los años 1947 y 1952 por Palau Ferrer y el realizado en la actualidad.

En particular, la investigación, aquí postergada, de la estructura de las poblaciones, su demografía y la evolución de las mismas ante diferentes impactos, permitiría esbozar las líneas generales de una gestión correcta de las especies en regresión o en peligro de desaparecer. En toda el área mediterránea la acción humana ha sido muy importante desde la antigüedad. El cambio de hábitos o tipos de gestión por parte del hombre puede conllevar pérdidas notables en la biodiversidad. [N. de la R.: Angel Romo abunda en esta cuestión en su libro *Flores silvestres de Baleares*, donde aporta una descripción de las plantas más frecuentes y endémicas, con claves dicotómicas para facilitar su reconocimiento. Introduce varios taxones nuevos. Para cada especie se indica su ciclo biológico.]

Digitalis minor

El estudio pluridisciplinar de los marjales ampurdaneses, en el litoral gerundense, se ha llevado a cabo de acuerdo con los mismos parámetros que el anterior. Se empieza por el medio físico, la formación del llano deltaico y su dinámica. Luego, se listan las especies de plantas y animales, para ocuparse al fin de las comunidades vegetales.

El libro adolece de las mismas lagunas y defectos conceptuales que la obra sobre Cabrera. Estas áreas presentan un determinado grado de biodiversidad si el hombre interviene de forma

continuada. Los cambios en el uso de un territorio, en estas zonas deltaicas, tienen respuestas muy rápidas entre las plantas, ya que el potencial colonizador de plantas de humedales es muy elevado. Estos aspectos no quedan recogidos en la obra. La disminución de la presión ganadera ha implicado una mayor extensión del cañizal frente a los prados higrófilos. Tanto la parte de flora como la de vegetación son meramente descriptivas, sin incluir elementos funcionales. El interés de este tipo de trabajos circunscritos, sobre todo si se trata de ecosistemas frágiles, sería mayor si se hiciese un seguimiento temporal.

En la obra sobre Canarias se abordan las características botánicas, silvícolas y morfológicas de las laurisilvas. Los bosques de laurifolios forman un ecosistema peculiar en el conjunto de la región biogeográfica Macaronésica, que esconden los antepasados de una parte importante de la flora mediterránea. Estos bosques, representados por especies con características propias de plantas arcaicas, se hallan en alarmante regresión. Las mayores extensiones se encuentran en la Gomera y por orden decreciente en Tenerife, La Palma, Hierro y por último en Gran Canaria, donde son testimoniales.

Para estudiar con más detalle estas formaciones se ha realizado un muestreo exhaustivo en 44 parcelas, con el fin de relacionar parámetros ecológicos con las respectivas fitocenosis. Los resultados obtenidos se ciñen a los valores medios de diferentes parámetros muestreados. Quizá se podrían haber extraído más información de los muestreos de campo y no ceñirse a una lectura tan restrictiva de los mismos. Afortunadamente un anexo con las características de las parcelas permite acceder a todos los datos de base y a la documentación recogida en el estudio.

En la *Flora de Castilla y León* el nombre de la obra es más ambicioso que el contenido real. Para cada una de las especies se ha seleccionado un pliego de herbario que aparece fotografiado. No se recogen ni valoran citas previas, ni la distribución general de las plantas en el área de estudio ni la general. Unicamente se indica la procedencia del material fotografiado. Una escueta descripción de la época de floración y algún parco comentario más es todo lo que el lector puede encontrar. Obra editada muy cuidadosamente, que sin llegar a ser una flora servirá para reconocer las especies castellano-leonesas. (A. R.)

Zoología

Métodos de trabajo

LE CHEVAL ET LES AUTRES ÉQUIDÉS: ASPECTS DE L'HISTOIRE DE LEUR INSERTION DANS LES ACTIVITÉS HUMAINES. Dirigido por Liliane Bodson. Université de Liège, 1995. **ANIMALS IN CELTIC LIFE AND MYTH**, por Miranda Green; Routledge; Londres, 1992.

LATIN NAMES EXPLAINED. A GUIDE TO THE SCIENTIFIC CLASSIFICATION OF REPTILES, BIRDS AND MAMMALS, por A. F. Gotch. Blanford; Londres, 1995. **EINFÜHRUNG IN DIE ARABISCHE ZOOGRAPHIE**, por Herbert Eisenstein. Dietrich Rewimer Verlag, 1991.

BUFFON 88. ACTES DU COLLOQUE INTERNATIONAL PARIS-MONTBARD-DIJON. Dirigido por Jean Gayon; Librairie Philosophique J. Vrin; Paris, 1992. **DIARIO DE DON FRANCISCO DE PAULA MARTÍNEZ Y SÁEZ**. Edición crítica de M. Angeles Calatayud; CSIC; Madrid, 1994.

A HISTORY AND ATLAS OF THE FISHES OF THE ANTARTIC OCEAN, por Richard Gordon Miller. Foresta Institute for Ocean and Mountain Studies; Carson City, 1993. **COMPARATIVE NEUROBIOLOGY IN CHIROPTERA**, por Georg Baron, Heinz Stephan y Heiko D. Frahm. Birkhäuser; Basilea, 1966.

El inicio de todo saber nace del afán del hombre por hacerse con su entorno. Ese hacerse fue en un comienzo ruda pugna con los animales por el alimento y el cobijo. Lucha primero, domesticación luego, para culminar en una tercera fase, científica. Con la domesticación aparecieron muchas enfermedades, pero también un innegable progreso. Quizá fue el perro el primer animal en someterse. Tras éste, el caballo condicionó la historia del hombre. Sobre los équidos y el hombre reflexionan diversos autores en *Le cheval et les autres équidés: aspects de l'histoire de leur insertion dans les activités humaines*, publicado en el marco de la colección de historia de la zoología que dirige Liliane Bodson.

A comienzos de la actual interglaciación, el área de distribución del caballo salvaje se fraccionó con la expansión de los bosques. En el curso del tercer milenio, se empezó a domesticar en determinados puntos de Europa meridional (España, Portugal y Francia), proceso que se convirtió en uno de los factores de cambio económico que marcaron el tránsito de la edad de Piedra a la de los metales. En el Próximo Oriente se conocía contemporáneamente el asno y su antepasado salvaje, el onagro. El caballo se menciona en los archivos económicos de la dinastía de Ur II.

Los hyksos introdujeron el caballo en el delta egipcio en algún momento del Segundo Período Intermedio (1783-1550 a.C.). De su penetración a lo largo del valle del Nilo tenemos documentación iconográfica. Sucedió ello durante el Período Nuevo (1550-1070 a.C.). En ese intervalo de cinco siglos, la producción artística se divide en tres fases: preamarniana, que corresponde al comienzo de la 18 dinastía; amarniana, coincidente con el reinado de Amenhotep IV- Akénaton; y postamarniana o ramésida, de las dinastías 19 y 20. A lo largo de esa trina periodización el arte egipcio se desarrolla de manera bastante homogénea. Nos pinta dos tipos de caballo: el longilíneo, con las crines sueltas sobre un cuello grácil, grupa ósea y en posición de descanso; y el brevilíneo, de talla pequeña, cabeza cuadrada y perfil rectilíneo o cóncavo, cuello arqueado y actitud fiera.

En la cuenca mediterránea nació, mil y pico años después, la hipología, que reconoce en Opiano de Apamea de Siria uno de sus fundadores. Vivió en tiempos de Caracalla y escribió una famosa *Cynegetica*, con un extenso apartado reservado para los caballos que habían de participar en las partidas de caza. Los criadores debían seleccionar las mejores razas hasta obtener el que tuviera cabeza chica, mirada penetrante, orejas cortas, pecho abierto, manos firmes y ancas poderosas.

Para los celtas, un pueblo que se extendía desde Irlanda hasta Checoslovaquia y abrazaba buena parte de la Europa transalpina, la sacralización de la naturaleza les condujo a un respeto y veneración extremos de los animales, según nos describe Miranda Green en *Animals in Celtic life and myth*. Green apoya su trabajo, que abarca del 600 a.C al 400 d.C., en la arqueología, iconografía y fuentes escritas. Estas últimas corresponden a dos categorías: comentarios de los observadores greco-romanos de los celtas de las Galias o Britannia y compilaciones escritas de las tradiciones orales de Irlanda y Gales. Aunque los primeros testimonios transcritos tienen el valor de la contemporaneidad, el mundo "civilizado" del Mediterráneo tendía a despreciar los "bárbaros del Norte". También las compilaciones deben tomarse con cautela. Las primeras



1. Enterramiento ritual de un caballo y un perro en Danebury

referencias irlandesas se anotaron en el siglo sexto d.C., si bien apenas nos han llegado manuscritos anteriores a 1100. Redactados por monjes la mayoría, algunos relatos —el ciclo de Ulster— incluían, sin embargo, tradiciones paganas precristianas.

Los celtas dependían de los animales domésticos para su vida diaria, de las especies salvajes para la caza y del caballo para la guerra. A comienzos de la edad de Hierro, en el siglo octavo a.C., los pueblos de la Europa templada tenían una economía diversificada que incluía cosechas de cereales y de hortalizas, así como la cría de ganado: vacuno, ovino, porcino y caballar. Cuidaban cabras y cercaban gamos. Construían apriscos para los rebaños que vigilaban los perros, guardianes también éstos de la casa, donde ronroneaban los gatos.

El vacuno era pequeño, ligero y más enteco que el romano o el de tiempos modernos. Pertenecía a una especie ahora extinguida de cornamenta mocha, *Bos longifrons*. Fueron los progenitores de la raza irlandesa Kerry y de la gaélica Black. Hace dos mil años un grupo celta se trasladó con su rebaño de ovejas a las islas escocesas de St Kilda. De esas ovejas proceden las Soay actuales. Aunque las cabras no se distinguen fácilmente de las ovejas en el registro fósil, todo parece indicar que aquéllas, apreciadas por su leche, abundaban menos. Los cerdos desempeñaron una misión similar en la economía y mitología de la primitiva Irlanda y de Escocia.

Los caballos celtas eran pequeños y ligeros comparados con los romanos. Servían de monturas (quizá para rodear los rebaños) y de alimento. Los asnos se conocieron en fases muy tardías de la edad de Hierro en Galia. Ateneo cuenta que los celtas que vivían cerca de corrientes de agua comían peces que preparaban con sal y comino. Salvo en Val Camonica, la caza cumplía una función lúdica. Perseguían venados, jabalíes, tejones, aurocos, zorros, armiños y liebres. No parece que cazaran ni lobos ni osos. Una vez sacrificado el animal se aprovechaban los huesos para agujas, peines y otros útiles; con el cuero se vestían y trenzaban cuerdas con sus tendones.

No suele recibir el alumno de las facultades de biología unas lecciones introductorias de latín o griego. Se deja al albur del profesor de sistemática la explicación de ciertas técnicas lexicográficas que él, a su vez, aprendió empíricamente. Por esa y por otras razones debieran estar al alcance de los estudiantes los dos libros auxiliares que hemos seleccionado para manejarse con soltura en la bibliografía zoológica: *Latin names explained* y *Einführung in die arabische Zoographie*.

Los dos volúmenes se mueven en un nivel introductorio. Se da por sentado que el lector no ha abierto nunca una gramática latina ni una crestomatía del árabe literal que diría el maestro Asín. *Latin names* constituye una suerte de diccionario, varias veces reeditado, cuya justificación es palmaria: el uso normalizado de la denominación binomial linneana de las especies. Pero hay más. Las ciencias de la naturaleza emplean un sinfín de raíces griegas y latinas para designar objetos y procesos, cuya interpretación literal podría ser un buen eslabón para una ulterior profundización en el significado exacto al que remiten.

Para no aturdir al lector con un número exagerado de especies, que en su mayoría le serían desconocidas, se han seleccionado, de entre los vertebrados, los reptiles, las aves y los mamíferos. No todos, sino los habituales en la mayoría de los estudios. Para quien no se desenvuelva con soltura en ese ambiente, se ofrecen unas nociones elementales de sistemática general y taxonomía de los grupos mencionados. Con un brochazo de historia. La décima edición del *Systema naturae* de Carl Linné, la tomada por canónica, se publicó en 1758. Se trata de una fecha crítica, pues los nombres dados a las especies antes del primero de enero de ese año no se consideran válidos.

Existe una Comisión Internacional de Nomenclatura Zoológica que se ocupa de la prioridad del descubrimiento. Vigila también la homonimia. No se considera procedente la introducción de un nombre nuevo para cualquier organismo del reino animal cuando otro lo lleva ya. En 1799 se le impuso al ornitorrinco el nombre de *Platypus*, pero hubo de rechazarse porque un año antes se había llamado así a cierto escarabajo; se le sustituyó por el de *Ornithorhynchus*. Basta, sin embargo, la diferencia en una sola letra para evitar la homonimia: *Apis, Apos* y *Apus* no son homónimos. Sí se admite la sinonimia: *Caretta caretta* y *Thalassochelys caretta* son el mismo.

Llámase especie tipo a la que ha servido para crear determinado género. Aunque antaño los propios explora-

dores solían imponer los nombres a las especies que cazaban, desde hace tiempo esa tarea se reserva al investigador de laboratorio, que estudia con mayor detenimiento su anatomía interna y morfología externa. Se acostumbra concederle el nombre del descubridor: el kiwi manchado, *Apteryx haasti*, debe el epíteto de especie a sir Julius von Haast, explorador de Nueva Zelanda. *Elaphurus davidianus* es un ciervo asiático que lleva el nombre específico del misionero que lo describió, Armand David. Y así, infinitos.

Einführung in die arabische Zoographie. Das tierkundliche Wissen in der arabisch-islamischen Literatur exige algo más de esfuerzo. La compensación es también de otro grado. El Corán, el derecho, el enciclopedismo, la historia, la geografía, los lapidarios, la medicina, la agronomía, la poesía, la cultura árabe en una palabra, se nos presenta a través de la denominación de los animales, de sus hábitos, importancia en la dieta y en los juegos, en la vida diaria y en múltiples dimensiones más. El trato directo con el medio animal facilitó un profundo conocimiento de sus costumbres, que a veces se tejía de fabulosas consejas o historias inconcebibles. La zoografía árabe tenía una clara intención teológica: mostrar que la observación de la naturaleza y las maravillas de la creación llevaban a reconocer la sabiduría y omnipotencia de Alá.

Los primeros textos árabes sobre zoología, si por tales entendemos los del medievo, se fundaban en la traducción-adaptación de los tratados naturalistas de Aristóteles y en una versión árabe más o menos libre del *Physiologus* (*Bestiarium*). En el 815 d.C. apareció ya una traducción árabe de la *Historia animalium* de Aristóteles realizada por Ibn al-Bitriq. La traducción de las versiones árabes al latín, con interpolaciones orientales, enriqueció la zoología de Occidente.

Demos otro salto. El zoólogo debe conocer las obras de quienes le precedieron. Su disciplina brilló en el firmamento científico de los siglos xviii y xix. Entre las múltiples maneras de hacer zoología sobresalieron dos de antipolares planteamientos: la generalizadora, omniabarcable, y la modesta taxonómica. Figura preeminente de aquel proceder fue Georges-Louis Leclerc (1707-1788), más conocido por conde de Buffon, título que le concedió Luis XV; pundonoroso cultivador del segundo método, Francisco Martínez y Sáez.

Con motivo de cumplirse el bicentenario de la muerte del primero, se celebró un coloquio universal cuyas ponencias se recogen en *Buffon 88. Actes du colloque international. Paris-Montbard-Dijon*, con prólogo de Ernst Mayr y epílogo de Georges Canguilhem. Buffon nació en Montbard, estudió con los jesuitas en Dijon y desarrolló su actividad profesional en París. Entre el manojo de ideas globalizadoras de su tiempo destaca la concepción vitalista del mundo orgánico. Crítico del mecanicismo, de corte cartesiano o médico de Boerhaave y Hoffmann, Louis La Caze había formulado el vitalismo en el *Specimen Novi Medicinae Conspectus* (1749), cuya versión francesa *—Idée de l'Homme Physique et Moral—* cayó en manos de Buffon. De acuerdo con el credo vitalista, haya o no un principio distinto del alma, los fenómenos orgánicos están más allá de cualquier explicación mecanicista de la materia; además, la vida no emerge de la mera organización y media un hiato insalvable entre lo vivo y lo inerte. Por último, el organismo constituye una entidad singular y sintética, no una suma de partes. ¿En qué medida Buffon adaptó o reformuló esta concepción? Los fisiólogos más inquietos del siglo xviii pugnaron por encontrar en el dominio del ser vivo una ley general y una fuerza capaz de explicar todos los fenómenos, un correlato de la atracción newtoniana. Buffon propondrá unas fuerzas penetrantes que, en la nutrición y en la reproducción, aseguran, con el molde interior, la permanencia de la forma.

La cadena de los seres, entendida como grados de participación de la vida, constituye otra idea comprehensiva. Los principios de plenitud y de continuidad, que caracterizan a esa sucesión de engarces, no limitan su proyección a las especies y su clasificación, sino que condicionan también la distinción que establezcamos entre la vida y la muerte. Buffon pone el énfasis en los matices insensibles que la naturaleza nos oculta y que nos obligan a aceptar el carácter artificial de las divisiones de los taxónomos: "hay seres que ni son animales, ni vegetales ni minerales", escribió en la *Histoire des animaux*. Cabe siempre la posibilidad de que haya seres intermedios que sirvan de puente.

Sostenía Buffon que todos los organismos constan de una clase particular de materia viva, que él denominó *moléculas vivas orgánicas*. En los organismos superiores, esas partículas orgánicas se unían, en la descendencia, a través de la acción del molde interior. Buffon sustituía, por la materia activa y las fuerzas materiales, los gérmenes preexistentes y estructuras preformadas en el proceso de reproducción. Mas, por mucho que apeló a la experimentación y a la observación en que se apoyaba, casi nadie le creyó. Joseph Lelarge de Lignac, Albrecht



2. Integrantes de la Comisión Científica del Pacífico. De izquierda a derecha: Juan Isern, Fernando Amor, Marcos Jiménez de la Espada y Francisco de Paula Martínez. Sentados: Patricio María Paz y Membiela y Manuel Almagro



3. Pagetopsis macropterus *en su medio*

von Haller, Martin Ledermüller, Lazaro Spallanzani, Charles Bonnet y Abraham Trembley plantearon serias reservas. Dado el peso de tales críticos, la historia (Rostand, Gasking, Roger y Castellani) también le negó el pan y la sal. Y así se repite que las observaciones fueron incorrectas, deficientes los instrumentos o desmesurada la interpretación. La verdad, muy otra de acuerdo con el trabajo aquí presentado, constituye un excelente caso histórico donde salen a flote la irresolución de los experimentos, la carga teórica de las observaciones y el papel de los factores sociales y políticos en los debates científicos.

Buffon reafirmó su creencia en la generación espontánea en 1777 en el *Supplément* a la *Histoire naturelle*. Allí habló de cuerpos pequeños organizados que existen sólo "por generación espontánea" y que "ocupan el intervalo que la Naturaleza ha puesto entre la molécula orgánica viva y el animal o el vegetal". Buffon llegó incluso a especular que, si se extinguieran todos los seres vivos de la Tierra, las moléculas orgánicas volverían a recombinarse en nuevos organismos, algunos de los cuales podrían reproducirse. Así pues, las nuevas especies, similares a las anteriores, tornarían a repoblar el mundo.

El *Diario de don Francisco de Paula Martínez y Sáez* pertenece a otra forma de recuperar el pasado: la documental. El esfuerzo es mérito de M. Angeles Calatayud. Recoge los avatares de la Comisión Científica del Pacífico (1862-1866), "viaje de buena voluntad" organizado por la Corona, a imagen de los impulsados casi cien años antes. El Real Cuerpo de Marina tomó a su cargo el verificar las observaciones relativas a las ciencias astronómicas y físicas; se reserva para la "comisión científica" los trabajos naturalistas. Integran la comisión científica Patricio Paz y Membiela, presidente; Fernando Amor y Mayor, catedrático del Instituto de Valladolid; Francisco de Paula Martínez y Sáez, ayudante interino de la Facultad de Ciencias de Madrid; Marcos Jiménez de la Espada, ayudante del Museo de Ciencias Naturales; Bartolomé Puig y Galup, ayudante disecador del gabinete de Historia Natural de la Universidad de Barcelona; Juan Isern, ayudante colector del Museo de Ciencias Naturales; Rafael Castro y Ordóñez, fotógrafo. Amor se encargó de las crónicas del viaje y las funciones de secretario corrieron a cargo de Martínez.

Esta edición del manuscrito debe agregarse a las descripciones y relatos de otros participantes, así como a la historia, no superada, que escribió Agustín J. Barreiro, hace ahora 70 años. Declara Calatayud que se ha limitado a transcribir el original con leves retoques, añadir una biografía del autor y apostillar los recuerdos con noticias que ha podido reunir del viaje, añadiendo un minucioso itinerario que facilite la consulta de la ruta seguida por la expedición. Incluye también seis cartas originales: tres de Martínez, una de Fernando Amor, otra de Paz y la última de Isern, dirigidas a Laureano Pérez Arcas. Se han reproducido, asimismo, varios de los dibujos que Martínez fue esbozando en su *Diario* y algunas fotografías de Castro.

Martínez fue un naturalista arquetípico de los que proliferaron en la España de la segunda mitad del siglo xix y principios de la siguiente. Respondían éstos a un perfil harto repetido; a saber: se forma en Madrid donde recibe una enseñanza más amplia que profunda de los tres reinos; vela sus primeras armas como conservador en algún centro oficial y oposita pronto a cátedra de instituto, para recalar en la Universidad Central; suele ser minucioso en las descripciones de las especies, inquieto en sus salidas al campo, pero remiso a formular cualquier hipótesis que ponga en cuestión los cimientos de la sistemática; si no es fundador de la Sociedad Española de Historia Natural, al menos pertenece a ella; publica sus resultados en las *Actas* de dicha institución; si acaso, más que conocer, milita en una filosofía determinada, lo que explica su vehemencia política.

En los escasos intervalos en que se aparta de la labor documentalista, Calatayud cae en algún que otro desliz. Por ejemplo, asigna a quien firma el prólogo de esta edición impresa del *Diario* un texto copiado casi *ad pedem litterae* de Barreiro. Y cuando la fuente secundaria es incorrecta, no la enmienda: *Rhizotrogus Zapaterii, Bolivarii*, en la fuente en que se inspira, en vez de *Rhizotrogus Zapaterii, R. Bolivarii*. Las notas ganarían mucho si se hubiera dado el nombre linneano de las especies que se van citando en el *Diario*. Alguna acotación a ciertos personajes (Bompland, Gay) facilitarían un mejor conocimiento del viajero. Dígase lo mismo de una lectura comentada de ciertas expresiones; por ejemplo, a propósito de la fragilidad de la selva amazónica: "Un hacha basta sola para hacer europeo el aspecto de estas selvas, y, aun, para hacerlas degenerar hasta el estado de la más completa aridez, cuando, esquilmadas por un mismo cultivo, son abandonadas." O sobre los medios que se emplean —mangas para peces pequeños o cazos para lavar el fango.

¿Cómo procede hoy la zoología? Sacrificando muchísimas otras, nos ceñiremos a dos líneas de particular fecundidad, la geográfica y la comparada. Simbolizamos la primera en el libro de Richard Gordon Miller *A History and Atlas of the Fishes of the Antartic Ocean*, escrito con la colaboración de Philip A. Hastings y Josette Gourley. Ejemplo sobresaliente de la segunda línea es *Comparative neurobiology in Chiroptera*,

una obra exhaustiva redactada por Georg Baron, Heinz Stephan y Heiko D. Frahm.

Las aguas del polo Sur han experimentado una profunda evolución a lo largo de los últimos treinta millones de años. Coevolucionó con el océano una ictiofauna adaptada al frío y al hielo. Hoy la zona divisoria se fija en la Convergencia Subantártica, línea en que las gélidas aguas superficiales del Antártico salen al encuentro de las aguas más cálidas del Subantártico, en la parte más meridional de los oceanos Atlántico, Pacífico e Indico. Esa barrera hidrológica impide la migración de especies desde allende la Convergencia hacia la zona templada, y desde ésta hacia aquélla. El ictiólogo puede, pues, estudiar un hábitat de contornos definidos, aunque no excesivamente rígidos.

Y lo primero que halla es una asociación de peces estrechamente emparentados. Con una óptica más fina el zoogeógrafo distingue hasta cuatro regiones latitudinales diferenciadas. Por ceñirnos a la primera, las aguas costeras, es un hábitat de bajas temperaturas permanentes donde medran numerosos peces circumpolares. Las aguas más frías son las de los mares epicontinentales de Ross y Weddell, en contacto directo con el glacial continental. Buscan allí refugio peces de los géneros *Trematomus, Pseudotrematomus, Pagothenia* y ciertas especies de *Notothenia* (todos de las familia Nototheniidae), así como varios representantes de las familias Artedidraconidae, Bathydraconidae y Channichthydae.

Los peces del Antártico, que proceden del Mioceno medio o superior, se congregan en torno unas dieciocho familias con unos 75 géneros y unas 200 especies. Los peces de aguas medias y profundas que medran más allá de la línea de Convergencia pueden acceder a las aguas profundas de los océanos adyacentes; en su mayoría pertenecen a familias que no están limitadas al oceano Antártico. Entre las familias no endémicas representadas en las costas antárticas hay dos que tienen especies endémicas, la Liparididae y la Zoarcidae.

Gracias al atlas que se acompaña resulta fácil identificar cualquier pez antártico que se nos muestre. El criterio seguido para la identificación se funda en los caracteres anatómicos. En lo que es un buen ejercicio práctico de sistemática Philip A. Hastings estudia el parentesco de los peces del suborden Notothenioidei, donde revisa y somete a criba los rasgos morfológicos que encierran significación filogenética: radios de las aletas, órgano accesorio nasal, opérculo, escamas, branquias y así hasta treinta.

¿Qué misterio encierra el cerebro de los murciélagos para dedicarles una extensa monografía en tres volúmenes? Sólo los quirópteros, entre los mamíferos, vuelan. Otros (*Cynocephalus*, *Petaurus* y la ardilla voladora) pueden desenvolverse también en medio aéreo, pero se trata de un vuelo pasivo. La posesión de alas que permiten el vuelo activo se ha tomado como rasgo diacrítico para inferir el origen monofilético de los murciélagos. Estos sobresalen también por su amplia diversidad. Hay 950 especies.

El orden de los quirópteros se divide en dos subórdenes: los megaquirópteros y los microquirópteros. Pese al mismo diseño básico, los dos grupos difieren en múltiples rasgos funcionales y morfológicos. Las diferencias más características se encuentran en el equipamiento sensorial. Los microquirópteros tienen capacidad para la ecolocación, mientras que los megaquirópteros, con excepción del género *Rousettus*, carecen de esa capacidad.

Los quirópteros son en general crepusculares o nocturnos. Los mega se orientan por la luz, los micro por los ultrasonidos. La mayoría de los microquirópteros son insectívoros, pero se han dividido en grupos diversos fundados en estrategias de forrajeo. Algunas especies insectívoras cazan presas en vuelo; otras recogen su alimento de la superficie. Abundan los murciélagos vegetarianos, que viven de frutos, néctar o polen. Hay especies carnívoras, piscívoras y omnívoras.

Además de esa variabilidad en ecología alimentaria, los quirópteros se caracterizan también por una notable diversidad de nidos: unos están expuestos en árboles o arbustos; otros excavan agujeros; otros en cuevas, e incluso en edificios. También la estructura social de los quirópteros es multiforme en términos del número de individuos en un grupo social, su composición o proporción de sexos, su organización jerárquica y variabilidad estacional.

La cabeza de los quirópteros muestra una extensa variedad de formas. El rostro puede cubrirse de berrugas, pelos, arrugas u hoyuelos; puede presentar anexos epidérmicos y pliegues. Algunas especies tienen foliación nasal, una suerte de excrecencia epidérmica más o menos compleja revestida de pelos finos. El cráneo puede ser largo y delgado, o corto y ancho; la caja craneana, aplanada o abovedada; el hocico, alargado o achatado.

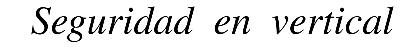
El cerebro es el órgano que controla todas las funciones del organismo: la interrelación y coordinación de todas las partes del cuerpo, así como las interacciones del organismo con su entorno. La estructura del cerebro de especies diferentes admite dos criterios de comparación. Las descripciones *cualitativas* aportan información sobre aspectos histológicos y citológicos del cerebro y sus partes en diferentes niveles de complejidad. Abarcan la citoarquitectura y las conexiones fibrosas. Los datos *cuantitativos* son valores medidos que expresan el tamaño o magnitud del cerebro y sus partes: peso, volumen, número de células y densidad celular. Gracias a las comparaciones cuantitativas podemos jerarquizar los datos y, por tanto, los grados de la capacidad funcional de una estructura o sistema.

Los autores han reunido, y procesado, más de 10.000 datos extraídos de 336 especies. Los animales se pesaron inmediatamente después de cazarlos, para evitar errores debidos a los cambios en peso corporal causados por la cautividad. Los animales muertos se midieron en seguida (peso corporal, longitud de cabeza y cuerpo, brazos, cola, orejas) antes de proceder a la perfusión y preparación.

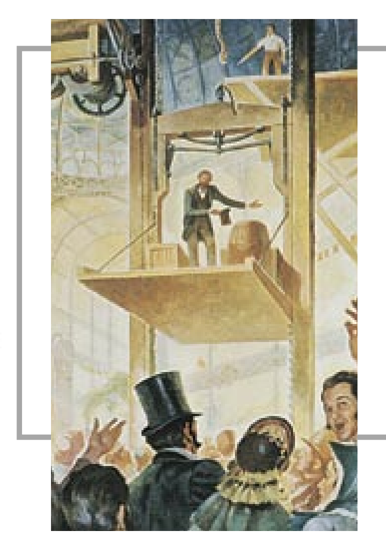
Existen diferencias características en el equipo sensorial. El menor desarrollo de las estructuras auditivas de los mega se refleja en el diámetro de la cóclea. Hay también diferencias en el sistema ocular. Los ojos, grandes y prominentes, de los mega tienen una morfología retiniana y coroidal única, que está ausente en los micro. Los ojos de los mega tienen todos los rasgos anatómicos de los ojos escotópicos adaptados para producir imágenes retinianas pequeñas y brillantes. Las estructuras cerebrales implicadas en la olfacción de los mega triplican, en tamaño, las de los micro; sin embargo, la mayor se encuentra en un micro, *Phylloderma*. La olfacción es el sistema más variable entre los quirópteros. En los mega las estructuras olfatorias ocupan una parte importante del telencéfalo. Los quirópteros difieren en el tamaño relativo de las regiones de la cavidad nasal y la complejidad de las *conchae* nasales. La olfacción desempeña un papel importante en la relación madre-hijo. (L. A.)

Ideas aplicadas

William Sheeran



Seguridad en vertical



OTIS EN EL AIRE

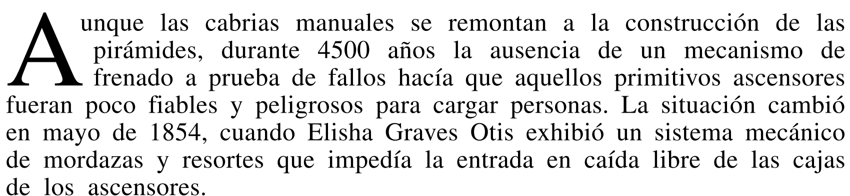
En la exposición de 1854 del neoyorquino Palacio de Cristal, ante un público pasmado, Elisha Graves Otis permitió a uno de sus ayudantes cortar la soga de la que colgaba la plataforma en la que se mantenía en pie. Gracias al mecanismo de seguridad de su invención la plataforma no se desplomó. Tres años después se inauguraba el primer ascensor de pasajeros, movido por vapor.

EL REGULADOR

Cuando la velocidad de descenso de un ascensor rebasa cierto límite, los contrapesos montados en un disco giratorio se mueven hacia afuera (*a*), soltando un conmutador (*b*) que desengancha y libera una mordaza oscilante (*c*). Esta, al caer, traba el cable del regulador (*d*).

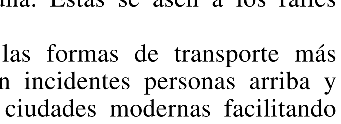
SEGURO

La tracción ejercida en el cable del regulador hace que suban las varillas de sustentación (*e*), liberando una pareja de cuñas (*f*) que trincan el raíl de guía, frenando el movimiento de la caja.

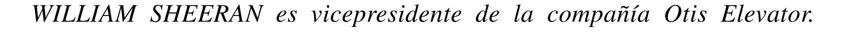


Aunque las cabrias manuales se remontan a la construcción de las pirámides, durante 4500 años la ausencia de un mecanismo de frenado a prueba de fallos hacía que aquellos primitivos ascensores fueran poco fiables y peligrosos para cargar personas. La situación cambió en mayo de 1854, cuando Elisha Graves Otis exhibió un sistema mecánico de mordazas y resortes que impedía la entrada en caída libre de las cajas de los ascensores.

La técnica que asegura la no peligrosidad de los ascensores ha avanzado extraordinariamente desde entonces. No obstante, los principios desarrollados por Otis siguen hoy en uso, incluso en los edificios más altos del mundo. En los ascensores modernos, el regulador, un sensor de velocidad, registra la velocidad de descenso. Si la caja se mueve demasiado rápido, un mecanismo activado por el regulador corta primero la corriente y aplica los frenos. Si aún así la caja no se para, un dispositivo instalado bajo la cabina de los pasajeros, el llamado seguro de retención, acciona unas mordazas en forma de cuña. Estas se asen a los raíles sobre los que se desliza la caja, deteniéndola en uno o dos segundos.

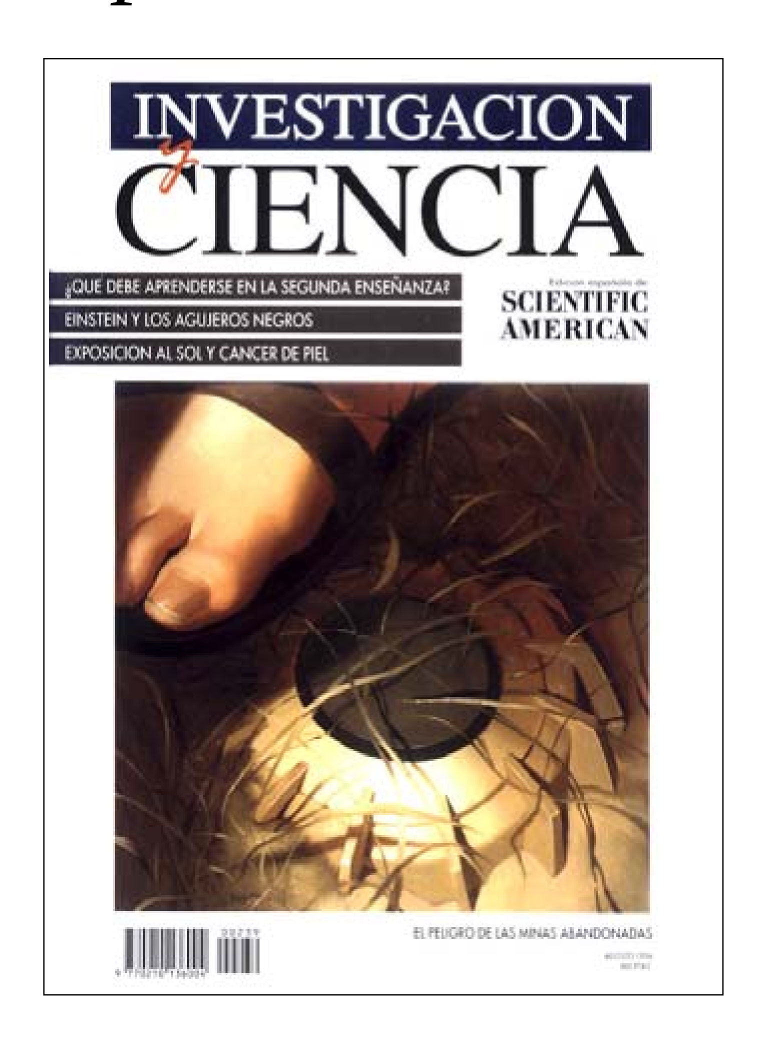


El invento del seguro de retención ha hecho del ascensor una de las formas de transporte más seguras del mundo. La capacidad de los ascensores para transportar sin incidentes personas arriba y abajo por un pozo vertical ha contribuido a conformar el perfil de las ciudades modernas facilitando el crecimiento hacia el cielo de los edificios.



WILLIAM SHEERAN es vicepresidente de la compañía Otis Elevator.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



¿QUE DEBE ENSEÑARSE EN EL BACHILLERATO?, por Pierre-Gilles de Gennes, Jean-Marie Lehn, Jean-Christophe Yoccoz, Francisco Rodríguez Adrados, Emilio Lledó, Antonio Domínguez Ortíz y Antonio García-Bellido

Desde el siglo pasado, no ha habido apenas gobierno en España que no reformara el plan de estudios del precedente. Investigación y Ciencia *ha solicitado a reconocidos representantes de distintas disciplinas, de Francia y España, que expongan qué enseñanza les hubiera gustado recibir a ellos.*

EL PELIGRO DE LAS MINAS ABANDONADAS, por Gino Strada

Las minas contra personas matan o mutilan a más de 15.000 individuos cada año. La mayoría de las víctimas son civiles inocentes; muchas son niños. Con todo, cada día se colocan millares de ellas.

CIENCIA DESDE EL FIRMAMENTO, por Tim Beardsley

La Estación Espacial Internacional será la obra más onerosa jamás construida. Aunque muchos científicos se oponen a tan descomunal proyecto, su oportunidad política lo hace ahora imparable.

EINSTEIN Y LOS AGUJEROS NEGROS, por Jeremy Bernstein

Las ecuaciones gravitatorias de Albert Einstein son los cimientos de la actual interpretación de los agujeros negros; irónicamente, él utilizaba las ecuaciones para demostrar que esos objetos no podían existir.

ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS NUCLEARES, por Chris G. Whipple

El estudio de la geología y la historia de la montaña de Yucca en Nevada aporta indicios útiles pero no conclusiones inequívocas.

LOS GELES, LIQUIDOS QUE NO FLUYEN, por Madeleine Djabourov y Jean-Michel Guenet

Se forman geles cuando se entrelazan ciertas moléculas en disolución formando una red que atrapa al disolvente. Se han propuesto una gran variedad de mecanismos, pero es la teoría de la percolación la que describe por qué los geles "prenden".

EL ARTE DE CHARLES R. KNIGHT, por Gregory S. Paul

Mucho antes que la película Parque jurásico, *las ilustraciones de Knight infundieron vida a los dinosaurios en la imaginación popular.*

LA RADIACION SOLAR Y EL CANCER DE PIEL, por David J. Leffell y Douglas E. Brash

Aunque la mayoría de los cánceres de piel aparecen en personas mayores, el daño suele aparecer décadas antes, cuando los rayos solares mutan una clave genética en una sola célula.

